

Ф. УИТОН

ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ

АКВА- КУЛЬТУРЫ



AQUACULTURAL ENGINEERING

FREDRICK W. WHEATON

*Agricultural Engineering Department
University of Maryland*

A WILEY-INTERSCIENCE PUBLICATION

JOHN WILEY & SONS, New York • Chichester • Brisbane • Toronto

Ф. УИТОН

ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ АКВАКУЛЬТУРЫ

Перевод с английского Н. В. Рынской и В. Л. Зубаре-
вича под редакцией кандидата географических наук
В. В. Сапожникова и кандидата биологических наук
Т. М. Аронович



Москва
АГРОПРОМИЗДАТ
1985

ББК 47.2
УЗ7
УДК 639.3.053.1+639.3.06

Уитон Ф. Техническое обеспечение аквакультуры: пер. с англ.— М.: Агропромиздат, 1985. — 528 с.

В книге профессора Университета штата Мэриленд (США) Ф. Уитона систематизированы сведения по всем техническим аспектам аквакультуры, с которыми приходится сталкиваться как биологам, работающим в области культивирования морских и пресноводных организмов, так и инженерам, проектирующим предприятия аквакультуры. Рассмотрены основные факторы внешней среды, влияющие на водные организмы. Большое внимание уделено техническим решениям при организации культивирования морских и пресноводных объектов в замкнутых, полужамкнутых и открытых системах и методам регулирования в них параметров среды.

Предназначена для инженеров, работающих в области аквакультуры, биологов и других специалистов, связанных с культивированием водных организмов.

Табл. 62. Ил. 343. Библиография — 517 названий.

ПРЕДИСЛОВИЕ К РУССКОМУ ИЗДАНИЮ

Известно, что в настоящее время интенсивность использования биологических ресурсов в традиционных морских и океанических районах близка к предельной. Затраты на освоение новых объектов промысла, ведение промысла в отдаленных районах, а также стоимость судов, орудий лова и судового топлива постоянно возрастают. Кроме того, во всем мире наблюдается тенденция перехода на вылов более низких и менее ценных трофических звеньев: водорослей, зоопланктона, моллюсков, кальмаров и др.

Когда-то океан казался неисчерпаемым, и сначала рыболовство, естественно, обходилось дешевле, чем разведение рыб. Но так же как и на суше, где человек отказался от свободной охоты и перешел к выращиванию домашних животных, разведение рыбы постепенно стало рентабельной отраслью хозяйств. Трудности, переживаемые морским рыболовством, дающим пока основную долю рыбопродукции, с одной стороны, и бурное развитие естественных наук (биологии, физики, химии) наряду с достижениями техники — с другой, способствовали росту капитальных вложений в аквакультуру.

С 1975 по 1980 гг. мировая продукция аквакультуры возросла на 26 % и превысила 10 млн. т, что в настоящее время составляет более 10 % общей добычи морепродуктов. В развивающихся странах Африки, Азии и Латинской Америки интерес к аквакультуре обусловлен острой нехваткой пищевого белка, а в индустриально развитых странах — возрастающим спросом на деликатесные продукты аквакультуры (устрицы, форель, лосось, угорь).

СССР обладает огромными возможностями для развития аквакультуры. Наибольшее развитие в нашей стране получила одна из областей аквакультуры — прудовое рыбоводство. В настоящее время продуктивность этих хозяйств достигает 60—70 ц/га.

В области марикультуры результаты пока еще незначительны, что объясняется трудностью работы с морскими объектами, хотя разведением лососевых и осетровых у нас начали заниматься около 100 лет назад. В настоящее время из чисто морских видов рыб в СССР культивируют кефаль, глоссу, калкана, треску, зубатку, сельдь, а из беспозвоночных — креветок, гребешка, мидий, устриц и водоросли. Все большее развитие получают работы по полноточковому выращиванию лососевых в береговых бассейнах с прес-

ной и морской водой. Общий ход развития науки позволяет все полнее осознавать, что разведение холоднокровных (рыб и беспозвоночных) значительно выгоднее, чем теплокровных животных, так как последние более половины своего рациона расходуют на поддержание постоянной температуры тела.

Выращивание водных животных дешевле, чем наземных, поскольку водные организмы живут в воде, а для наземных необходимы отапливаемые фермы. Во-первых, цыплята, телята, поросята потребляют те же корма, что и взрослые животные, а водные организмы, находясь на личиночной стадии развития, потребляют иные, более дешевые корма, чем взрослые особи. Во-вторых, водные организмы обладают несоизмеримо большей плодовитостью, чем теплокровные (например, плодовитость кефали-лобана достигает 8—10 млн. икринок). В природе половой зрелости достигают десятки экземпляров водных животных, а смертность в основном происходит на ранних стадиях развития. Понятно, что если в контролируемых условиях удастся повысить выживаемость водных объектов хотя бы на 1 %, то эффект от искусственного разведения будет огромным.

Долгое время развитие аквакультуры сдерживалось недостатком гидробиологических, гидрохимических и технических разработок. Последние достижения в области физиологии размножения, генетики и селекции, микробиологии и биохимии позволяют более полно реализовывать биологические возможности рыб, моллюсков и их сообществ в управляемых системах разного типа.

В связи с расширением масштабов культивирования в последние годы достигнуты значительные успехи в гидрохимическом контроле качества воды, создании автоматических систем непрерывного контроля и в общем понимании физико-химических механизмов продукционно-деструкционных процессов, протекающих в районах культивирования гидробионтов. К сожалению, «узким местом» до сих пор остается техническое оснащение рыбоводных хозяйств. Необходимость современного технического оснащения обострилась в последние годы в связи с интенсификацией работ по аквакультуре: увеличением плотностей посадки, многократным использованием воды в циркуляционных системах, выходом в прибрежную зону моря, который потребовал строительства садков, отгородок, замкнутых акваторий для содержания водных организмов, созданием автоматических кормушек, волнозащитных сооружений и т. д.

В предлагаемой читателям книге Ф. Уитона «Техническое обеспечение аквакультуры» основное внимание уделено именно техническому оснащению рыбоводных хозяйств. Ф. Уитон, профессор отделения техники и технологии сельскохозяйственного производства Университета штата Мэриленд, член Международного океанографического общества, сознательно посвятил всю первую часть книги физико-химическим свойствам воды, понимая, что без знания этих вопросов невозможно поставить аквакультуру на научную основу. Большое внимание уделено здесь также вопросам

гидрооптики, термическим и гидрохимическим характеристикам природных водоемов и изолированных систем. Подробно рассмотрены роль и круговорот биогенных элементов в продукционно-деструкционных процессах. Показаны значение процессов метаболизма и опасность накопления продуктов обмена гидробионтов для нормального функционирования природных экосистем. Основными преимуществами природных систем являются их сбалансированность и цикличность, которые исключают проблемы накопления отходов. Однако природные системы функционируют чрезвычайно медленно, и поэтому человек стремится увеличить продуктивность таких систем, не нарушая принципов их работы. Во второй части показано, что закономерности функционирования природных экосистем являются основой для оптимизации процессов культивирования водных организмов в искусственных условиях.

Подробно рассматривая во второй части книги проблемы создания искусственных водоемов, вопросы фильтрации, дезинфекции и аэрации воды, а также работу насосов и гидротехнических сооружений, автор приводит формулы, по которым можно выполнять необходимые технические расчеты. Все технические выкладки даны в конкретной и доступной форме.

В книге нашли отражение последние достижения физической и коллоидной химии, собраны и систематизированы сведения по сорбционным процессам, микробиологии, биохимии, что избавляет рыбоводов-практиков от необходимости искать соответствующую литературу.

Обобщение результатов многочисленных и очень дорогостоящих экспериментов, выполненное Ф. Уитоном, позволяет установить аналитические зависимости между скоростью потока, концентрацией продуктов обмена и насыщенностью воды кислородом. Многие зависимости представлены в виде номограмм, что существенно облегчает получение необходимых значений. Несмотря на эмпирический характер большинства формул, показаны пути применения их в каждом конкретном случае.

От выпущенных ранее книг по аквакультуре (Дж. Бардач и др. «Аквакультура», 1978; П. Милн «Морские хозяйства в прибрежных водах», 1978; С. Спотт «Содержание рыбы в замкнутых системах», 1983 и др.) книга Ф. Уитона отличается наибольшей полнотой охвата всех вопросов аквакультуры (особенно технических), поэтому она, несомненно, станет настольной книгой не только рыбоводов-практиков, но и гидробиологов, гидрохимиков, гидрологов, ихтиологов, гидротехников, океанологов, лимnologов и других специалистов, связанных с культивированием водных организмов. Кроме того, она может быть полезна студентам и аспирантам рыбохозяйственных вузов и биологических факультетов университетов.

В. В. Сапожников
Т. М. Аронович
(ВНИРО)

ПРЕДИСЛОВИЕ К СЕРИИ

Инженерная океанология — древняя, но вечно молодая наука. Тысячелетиями человек сталкивался со специфическими проблемами океана. Судостроение, защита берегов от разрушений и строительство различных сооружений в открытом море — области, которые и в прошлом требовали инженерных решений. Однако до последнего времени усилия специалистов были сосредоточены на отдельных проблемах и лишь недавно были предприняты попытки скоординировать деятельность инженеров различных специальностей, связанных с океаном.

Серия книг издательства «Джон Уайли энд Санз» по технике и технологии выполнения различных работ в океане предназначена для инженеров и научных работников, специализирующихся в различных областях инженерной океанологии. Книги этой серии написаны с таким расчетом, чтобы инженеры и ученые могли ознакомиться с основными принципами и техническими проблемами смежных специальностей. Они могут также служить учебными пособиями для студентов старших курсов и аспирантов. В книгах серии будут рассмотрены проблемы механики волн, морской коррозии, строительства береговых сооружений, гидродинамики морских судов, конструкции сооружений в открытом море и на морском дне, технические аспекты аквакультуры. Редакторы надеются, что эти книги восполнят пробел, который существует в литературе по проблемам инженерной океанологии.

Мишель Маккормик, редактор
Рейсмуор Батахария, пом. редактора

Техническое обеспечение аквакультуры — это применение технических средств при культивировании водных организмов. Аквакультура, как и используемые в ней технические средства, существует давно: первый пруд для выращивания рыбы был построен более 2000 лет назад. Однако до сих пор аквакультуре не уделялось столько внимания, сколько сельскому хозяйству, и она не получила широкого распространения. Такое отставание частично связано с тем, что в аквакультуру направляется меньше средств, чем в сельское хозяйство, а также с тем, что объектами аквакультуры являются водные организмы, изучение которых значительно сложнее, чем наземных, которые подобно нам, дышат воздухом.

В настоящее время быстрый прогресс и в сельском хозяйстве, и в аквакультуре требует значительных капиталовложений. При этом если развитые страны могут делать необходимые капиталовложения в аквакультуру, то менее развитые страны предпочитают вкладывать свои ограниченные средства в сельское хозяйство. К сожалению, поскольку наиболее развитые страны могут производить больше продуктов питания, чем требуется, или закупать необходимые продукты в других странах, они не заинтересованы в увеличении капиталовложений в аквакультуру. Менее развитые страны, многие из которых рассматривают аквакультуру как важный источник белка, не имеют средств для выполнения крупных исследовательских программ по аквакультуре.

Биологические исследования показали, что добыча традиционных объектов промысла в Мировом океане приближается к максимально возможной, а для поддержания продуктивности пресных водоемов необходимо проводить рыбоохранные мероприятия. Учитывая это, а также возрастающие во всем мире потребности в рыбных продуктах, интерес к аквакультуре значительно повысился даже в развитых странах. Возрастающий спрос на рыбные продукты вызван улучшением благосостояния населения во многих странах и увеличением потребностей в белке в связи с ростом численности населения.

К счастью, биология многих водных организмов изучена достаточно хорошо. Эти исследования послужили основой для создания промышленных хозяйств по разведению и выращиванию

объектов аквакультуры. Однако многое в этом направлении еще предстоит сделать. Например, биологию устриц изучают уже не менее 100 лет, а их промыслом стали заниматься задолго до возникновения Римской империи. Но, несмотря на это, до сих пор не разработаны рецептуры сбалансированных искусственных кормов для их выращивания от спата* до устриц товарных размеров. Более того, даже состав сбалансированного искусственного корма для устриц до сих пор не известен.

Тем не менее, несмотря на более или менее очевидные пробелы в знаниях биологии водных организмов, многое уже сделано. Однако использование накопленных данных по биологии для создания экспериментальных или промышленных хозяйств встречает значительные трудности. Использовать накопленные научные знания на практике и создать рентабельные хозяйства для получения товарной продукции — задача для инженеров и экономистов. В этой книге основное внимание уделено техническим аспектам аквакультуры, способам облова и проблемам функционирования водных систем. Иногда попутно освещаются экономические проблемы, в основном в связи с использованием того или иного технологического процесса в рентабельных промышленных хозяйствах. Автор сознательно опустил некоторые вопросы, в частности экономические и технологические, поскольку в одной книге невозможно осветить все проблемы.

Книга состоит из двух частей: в первой — основное внимание уделено взаимозависимости водных организмов и факторов внешней среды, приведены физико-химические и биологические параметры водной среды (пресной, соленой и солоноватой), представляющие интерес при культивировании водных организмов, рассмотрено их влияние на водные организмы с инженерных позиций.

Во второй части основное внимание уделено техническим проблемам, возникающим при культивировании водных организмов. Все эти сведения представлены в доступной форме не только для инженеров, но и для биологов, рыбоводов и других специалистов, знакомых с основами естественных наук. Сделана также попытка обобщить имеющиеся данные по всем аспектам технической аквакультуры.

В некоторых главах книги приведены сведения справочного характера по физике и биологии, необходимые инженерам, специализирующимся в области аквакультуры, биологам, административным работникам и специалистам-смежникам, связанным с культивированием водных организмов или рыболовством.

Ф. У. Уитон

Колледж Парк, Мэриленд
Июнь, 1977

* Спат — молодь двустворчатых моллюсков, прикрепляющаяся к неподвижным предметам. — *Прим. ред.*

Глава 1. АКВАКУЛЬТУРА — ПЕРСПЕКТИВНОЕ НАПРАВЛЕНИЕ РАЗВИТИЯ РЫБНОГО ХОЗЯЙСТВА

Аквакультура — получение товарной продукции из организмов, обитающих в водной среде, их обработка и реализация. Несмотря на то, что для широкой публики аквакультура — сравнительно новая область, существует она уже несколько тысяч лет. В течение многих веков аквакультурой занимались в Китае, Японии и в других странах Дальнего Востока. Первое упоминание об аквакультуре встречается в работе Фан Ли (Milne, 1973) и относится к 475 г. до н. э. В древних памятниках литературы и искусства Дальнего Востока нашли отражение сведения об аквакультуре. О культивировании устриц и других водных организмов упоминается также в работах древних греков и римлян.

В настоящее время работы в области аквакультуры с большей или меньшей интенсивностью проводятся почти на всех континентах, за исключением, очевидно, только Антарктиды. Почему же тогда аквакультура считается новым и перспективным направлением развития товарного рыбоводства во многих странах? Причин несколько, но все они прямо или косвенно связаны со следующими основными факторами: быстрым ростом численности населения земного шара; нехваткой продуктов питания, особенно дешевого белка высокого качества; приближением уловов в Мировом океане к максимальным значениям; отставанием продуктивности сельского хозяйства от роста народонаселения; возрастающим спросом на деликатесную продукцию в некоторых странах с высоким уровнем жизни.

НАСЕЛЕНИЕ

Численность населения земного шара ежегодно возрастает на 75 млн. человек (Demeny, 1974). Темп прироста населения в настоящее время составляет 20 человек на каждую тысячу, что превышает исторически сложившуюся норму в сотни раз. При современном темпе роста численность населения через 35 лет удвоится (Coale, 1974). По данным ООН, к 2000 г. население земного шара возрастет до 6,4 млрд. человек по сравнению с 3,9 млрд. в 1973 г.

Цифры малоутешительные, однако они не дают полного представления о предмете. Численность населения слаборазвитых

стран составляет 2,9 млрд., или 74 % общей численности населения земного шара (Демени, 1974). В то же время в этих странах ежегодный прирост населения составляет более 60 млн., т. е. 80 % ежегодного прироста населения земного шара (Демени, 1974). Таким образом, прирост происходит в основном за счет увеличения численности населения слаборазвитых стран, где ресурсы продовольствия ограничены.

Есть основания полагать, что темп прироста населения в развитых странах будет постепенно снижаться. В 18 в. и на протяжении большей части 19 в. в развитых странах численность населения быстро возрастала. Однако по мере развития промышленности темп роста населения снижался, и в настоящее время во многих развитых странах рождаемость низкая и прирост населения нулевой. Причины этого до конца не изучены. Ясно одно, что улучшение питания и медицинского обслуживания снизили смертность и увеличили среднюю продолжительность жизни. Снижение смертности привело к быстрому росту численности населения. В развитых странах рождаемость снизилась, однако ожидаемое увеличение продолжительности жизни несколько замедлилось. Удорожание воспитания детей в развитом обществе может быть одной из причин снижения рождаемости (Coale, 1974).

Если законы снижения рождаемости справедливы и для современных слаборазвитых стран, то по мере развития темп роста их населения также должен постепенно снижаться. Однако было показано, что даже если рождаемость во всех странах снизится до уровня восполнения численности, то к 1980 г. население Земли составит 6,3 млрд. человек. Если более реалистичная цель достижения к 2000 г. рождаемости на уровне восполнения численности во всех странах будет реализована, то к 2050 г. численность населения Земли составит приблизительно 8,2 млрд. Более 90 % этого прироста (4 млрд. человек) придется на долю слаборазвитых стран. К сожалению, стабилизация численности произойдет на уровне примерно 10—15 млрд.

Таким образом, если не произойдет какой-либо глобальной катастрофы, в последующие 50—100 лет население земного шара, которое необходимо прокормить и обеспечить всем необходимым, возрастет в 2—4 раза по сравнению с нынешней численностью.

ПОТРЕБНОСТИ В ПРОДУКТАХ ПИТАНИЯ

Полноценность продуктов питания — это не только достаточная калорийность для поддержания жизни. Рацион должен быть сбалансирован по калорийности, содержанию белков, витаминов и минеральных веществ. Мужчине весом 77 кг требуется от 1920 до 6000 ккал в день в зависимости от активности образа жизни. В среднем калорийность рациона должна составлять 1920—2520 ккал. Женщинам требуется меньше калорий, за исключением беременных и кормящих матерей. Ниже приведены уравнения

основного обмена для взрослых мужчин и женщин (Desrosier, 1961):

мужчины

$$\text{ежедневная потребность в энергии} = [130 + 11,02 (\text{вес, кг}) + \\ + 4,72 (\text{рост, см}) - 7(\text{возраст, годы})] 4,18; \quad (1.1)$$

женщины

$$\text{ежедневная потребность в энергии} = [660 + 8,82 (\text{вес, кг}) + \\ + 1,97 (\text{рост, см}) - 5 (\text{возраст, годы})] 4,18. \quad (1.2)$$

Таким образом, 35-летнему мужчине ростом 172,7 см и весом 72,6 кг требуется 1512 ккал в день при малоподвижном образе жизни, а 35-летней женщине ростом 165 см и весом 49,9 кг — 1248 ккал в день.

Мужчина нормального телосложения весом от 57 до 77 кг должен потреблять в день 70 г белка, а женщина весом 54—56 кг — 60 г (Desrosier, 1961). Кроме того, ежедневно в рацион должны входить витамины и минеральные вещества.

Принимая во внимание, что в среднем в день человеку требуется 1920 ккал и 65 г белка, можно вычислить суточную потребность населения земного шара в продуктах питания. Так, если на земном шаре проживает 3860 млрд. человек (Freedman, Ronald and Berelson, 1974), то ежедневная потребность в энергии продуктов питания составит $7,728 \cdot 10^{12}$ ккал и $2,5 \cdot 10^8$ кг белка. Поскольку ежегодный прирост населения составляет около 80 млн. человек (219000 в день), то потребности в энергии должны увеличиваться на $0,44 \cdot 10^6$ ккал, а в белке — на $1,4 \cdot 10^4$ кг в день.

Доступность продуктов питания для населения зависит от наличия источников пищи и эффективности их утилизации. Источниками удовлетворения потребностей человечества в продуктах питания могут быть земля, вода, питательные вещества, энергия, а также достижения современной техники и технологии. Когда в 1978 г. Томас Мальтус опубликовал свой знаменитый популяционный принцип (численность населения ограничена наличием продуктов питания, поскольку население растет в геометрической прогрессии, а продукты питания — в арифметической), он исходил из того, что источниками продуктов питания могут быть только земля, вода, а также энергия людей и животных. Наличие дополнительных ресурсов — главная причина того, что зловещие предсказания Мальтуса не сбылись.

Источниками получения продуктов питания могут быть сельское хозяйство, рыболовство и аквакультура. Сельское хозяйство до сих пор дает основную массу продукции, очевидно, в связи с тем, что в него вкладывалось значительно больше усилий, чем в рыболовство и аквакультуру. Сельским хозяйством люди начали заниматься около 10000 лет назад, и оно полностью вытеснило охоту, которая сохранила свое значение как основной источник получения продуктов питания только у примитивных племен. Ры-

боловство также уходит своими корнями в глубокую древность. По всей вероятности, рыболовством начали заниматься раньше, чем сельским хозяйством, но по разным причинам ему не уделяли столько внимания, сколько сельскому хозяйству. Общая продукция рыболовства велика, но значительно меньше продукции сельского хозяйства. Аквакультура — самая молодая отрасль, связанная с получением продуктов питания, хотя существует начиная с 500 г. до н. э. В настоящее время продукция аквакультуры составляет не более 1 % общей пищевой продукции.

Ниже все три источника получения пищевых продуктов рассмотрены более подробно.

СЕЛЬСКОЕ ХОЗЯЙСТВО

Сельское хозяйство — наука и искусство возделывания почвы, получения урожая и выращивания скота — насчитывает, как уже отмечалось, более 10 000 лет. Традиционно сельское хозяйство ориентировалось на животноводство и выращивание урожаев на суше. Безусловно, земля — наиболее важный источник получения сельскохозяйственной продукции, однако около 71 % поверхности Земли занято водой и только 29 % — сушей. В табл. 1.1 представ-

Таблица 1.1. Площади суши, континентального шельфа и отношение площади суши к площади континентального шельфа

Континент	Площадь суши, км ² · 10 ⁶ **	Площадь континентального шельфа, км ² · 10 ⁶ ***	Отношение площади суши к площади континентального шельфа
Азия***	44,96	9,38	4,79
Африка	30,31	1,28	23,68
Европа***	9,90	3,11	3,18
Южная Америка	17,83	2,43	7,34
Северная Америка	24,25	6,74	3,60
Океания	8,51	2,70	3,15
Антарктида	15,54	0,36	43,17
Всего	151,30	26,00	5,82

* Information Please Almanac, 1974, 371.

** Die Erdoberfläche Handbuch der Geophysic, 1933

*** СССР включен частично в Азию, частично в Европу.

лена общая площадь суши и показано, как она распределена между материками. Самой большой площадью на Земле располагает Азия, затем идут в убывающем порядке Африка, Северная Америка, Южная Америка, Антарктида, Европа, Океания. К сожалению, не все земли пригодны для сельского хозяйства. Потенциально пригодные для возделывания земли составляют 3,2 млрд. га (Science Advisory Committee, 1967), или примерно 24 % всей суши Земли, что в 2,3 раза больше площади возделыв-

ваемых в настоящее время земель и в 3 раза больше площади, с которой получают урожай в настоящее время, поскольку значительные площади должны отводиться под пар (Revelle, 1974).

Из 3,2 млрд. га, пригодных для пахоты, около 500 млн. га находятся в зоне влажных тропиков, для которых технология обработки почв до сих пор не разработана.

Отсутствие воды, второго источника получения продукции, ограничивает использование еще 300 млн. га пахотных земель. Несмотря на то что в настоящее время человек целенаправленно использует воду в первую очередь для ирригации, на эти цели расходуется только 4 % мирового речного стока. Этого достаточно, чтобы обводнить около 160 млн. га, т. е. примерно 1 % площади суши земного шара. Однако из-за неравномерного распределения осадков на поверхности земного шара только 30 % (около 90 млн. га) потенциально пригодных пахотных (при условии ирригации) земель можно действительно оросить. Ирригация может способствовать значительному повышению урожайности многих площадей. Потенциально пригодные для земледелия площади при осуществлении ирригационных мероприятий составят 1,1 млрд. га (Revelle, 1974):

За вычетом засушливых и переувлажненных земель потенциальная площадь пахотных земель составляет приблизительно 2,5 млрд. га. Таким образом, потенциально пригодная для земледелия площадь составляет немногим менее 4,1 млрд. га. Ревелл (1974) подсчитал, что урожая с этой площади было бы достаточно, чтобы прокормить от 38 до 48 млрд. человек при калорийности суточного рациона 400—5016 ккал, но при условии, что 10 % этой площади отводится под технические культуры, а при выращивании урожая используются те же достижения науки и техники, что и при получении пшеницы в штате Айова. Очевидно, последнее условие не может быть выполнено, учитывая современное состояние экономики. Большая часть неиспользуемых в настоящее время земель низкого качества и, по всей вероятности, никогда не даст таких урожаев, какие получают в штате Айова. Почва в штате Айова, на которой произрастает пшеница, одна из самых плодородных в мире. Для превращения скудных земель в плодородные необходимы большие капиталовложения — около 500—1000 американских долларов на 1 га (Revelle, 1974).

На рис. 1.1 показаны площади земель, пригодные, но пока не используемые для земледелия, по странам и численность населения по странам в процентах от общего населения Земли. Основная часть потенциально продуктивной площади расположена в районах с минимальной численностью населения: в Африке, Северной и Южной Америке, Австралии и Новой Зеландии. Несмотря на то что площадь, потенциально пригодная для земледелия, составляет 985 млн. га, только 630 млн. га расположено вне влажных тропиков и в районах с достаточным количеством влаги. В Африке и Южной Америке увеличение площади пахотных земель сдерживается не отсутствием природных ресурсов, а глав-

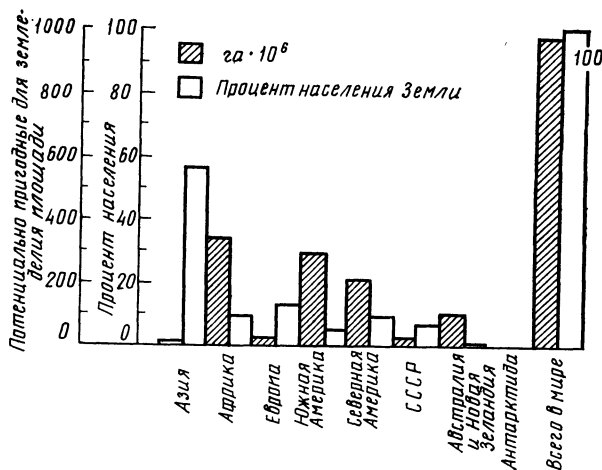


Рис. 1.1. Земли, пригодные для земледелия, но не используемые в настоящее время, и численность населения по континентам (Information Please Almanac, 1974; Revelle, 1974)

ным образом экономическими, социально-политическими и административными факторами. В Северной Америке и Австралии можно было бы освоить 300 млн. га потенциально пригодных для земледелия площадей при соответствующем экономическом стимулировании (Revelle, 1974). На рис. 1.2 показана общая потенциальная площадь пахотных земель и уже освоенные площади по континентам; на рис. 1.3 представлены те же данные, но в пересчете на душу населения.

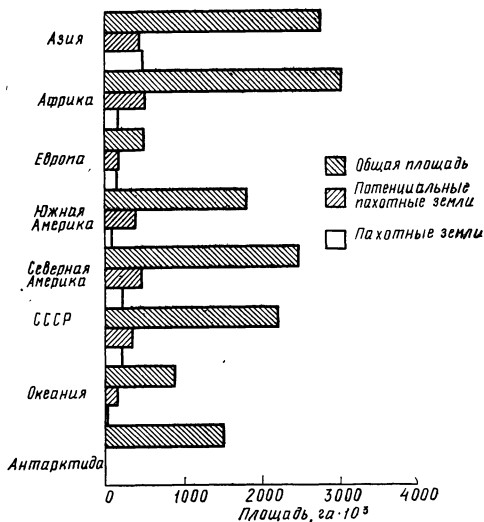


Рис. 1.2. Общая площадь потенциальных и используемых в настоящее время пахотных земель по континентам (Information Please Almanac, 1974; Revelle, 1974)

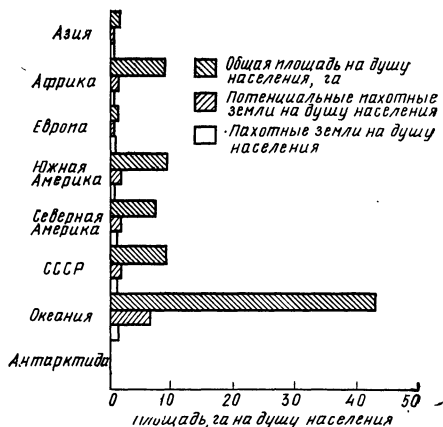


Рис. 1.3. Общая площадь используемых и потенциально пригодных пахотных земель на душу населения по континентам (Information Please Almanac, 1974; Revelle, 1974)

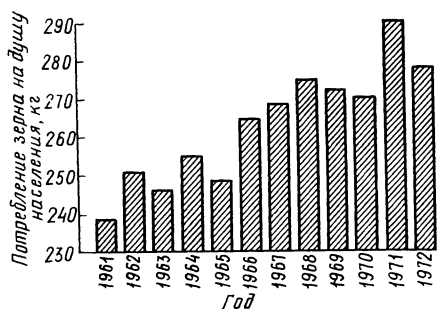


Рис. 1.4. Потребление зерновых на душу населения в 1961—1972 гг. (Production Yearbook, 1973; State of Food and Agriculture, 1973)

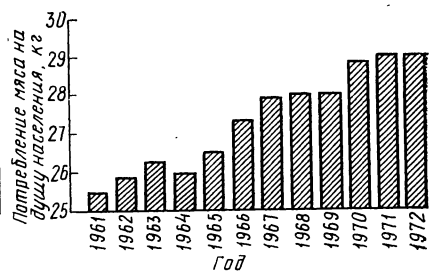


Рис. 1.5. Потребление мяса на душу населения в 1961—1972 гг. (Production Yearbook, 1973; State of Food and Agriculture, 1973)

Как видно из изложенного, имеется достаточное количество земель, которые при интенсивном ведении хозяйства могут прокормить человечество, по численности в 10—13 раз превышающее нынешнее население Земли. Однако социальные, общественные, политические и экономические причины тормозят освоение этих земель. Решить эти проблемы непросто, поскольку для этого необходимо изменить привычки, верования, традиции народов, а кроме того, требуются большие капиталовложения и применение новой технологии. Необходимо создавать новую технологию, что требует значительных затрат времени.

На рис. 1.4 показано мировое потребление зерновых на душу населения. Зерно является главным продуктом питания большей части населения и основой животноводства в высокоразвитых странах. Таким образом, откладывая по одной оси количество производимых в мире зерновых (пшеница, рис, ячмень, овес, кукуруза), а по другой — численность населения (потребление зерна на душу населения), можно получить график, дающий наглядное представление о темпах прироста того и другого. Из рисунка видно, что потребление зерна на душу населения возрастает. Если принять, что зависимость потребления зерна на душу населения от времени носит линейный характер, а отклонения от этой зависимости обусловлены только климатическими факторами, то по данным, представленным на рис. 1.4, можно построить линию регрессии. Зависимость, представленная на рис. 1.4, описывается следующим уравнением:

$$CC_c = 7441,5 + 3,92Y, \quad (1.3)$$

где CC_c — потребление зерна на душу населения, кг; Y — год (1961—1972).

На рис. 1.5—1.7 представлены данные по мировому потреблению мяса, молока и яиц на душу населения, которые описываются следующими уравнениями (считая зависимость линейной):

$$CC_{\text{мясо}} = 653,4 + 0,346Y, \quad (1.4)$$

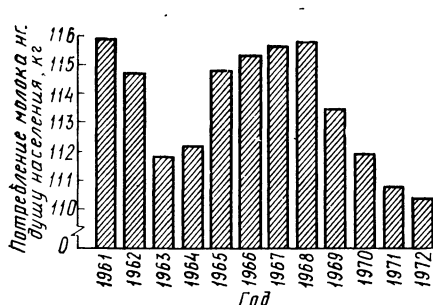


Рис. 1.6. Потребление молока на душу населения в 1961—1972 гг. (Production Yearbook, 1973; State of Food and Agriculture, 1973)

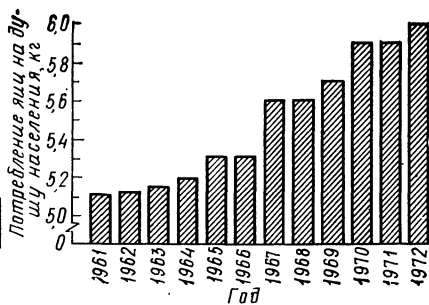


Рис. 1.7. Потребление яиц на душу населения в 1961—1972 гг. (Production Yearbook, 1973, State of Food and Agriculture, 1973)

$$CC_{\text{молоко}} = 697,6 - 0,279Y. \quad (1.5)$$

$$CC_{\text{яйцо}} = 172,1 + 0,0903Y. \quad (1.6)$$

Уравнения (1.3)—(1.6) показывают, что потребление зерна, мяса и яиц на душу населения постоянно возрастает и только потребление молока несколько снизилось. Наиболее быстрыми темпами растет потребление зерна на душу населения, несколько медленнее растет потребление мяса. Потребление яиц на душу населения возросло незначительно, а потребление молока снизилось (отрицательный наклон кривой). Таким образом, с 1961 по 1972 г. прирост производства зерна, мяса и яиц опережал прирост населения. В абсолютных единицах производство молока возросло с 352 до 415 млрд. кг, но его оказалось недостаточно для возросшего населения. Предположение о линейной зависимости данных на рис. 1.5—1.7, по которым сделаны соответствующие расчеты, дискуссионно, особенно по молоку, но они дают общую картину производства пищевых продуктов за 12-летний период.

Разрыв между производством продуктов питания и потребностью в них очень медленно сокращается. Однако значительная часть населения Земли недоедает, меньшая, но тоже довольно большая часть ежегодно погибает от голода. Миллионы людей не голодают, но их физическое и духовное развитие, а также работоспособность ограничены из-за неполноценного питания. Недостаток белка — серьезная проблема во многих странах мира, поэтому производство нетрадиционных сельскохозяйственных продуктов было бы важным дополнением к нашему общему столу. В связи с тем, что социальные, политические, экономические и религиозные факторы будут и в дальнейшем лимитировать быстрый рост сельскохозяйственного производства, получение продуктов питания из любых видов сырья позволит быстрее снизить число голодающих и недоедающих во всем мире.

Человек издавна использовал в пищу водные организмы. Рыбный промысел развивался параллельно с охотой, если люди жили вблизи водоемов. Однако на рыбный промысел перелов влиял сильнее, чем на охоту. Водные организмы живут в среде, менее благоприятной для человека, более труднодоступной и трудно познаваемой. В отличие от охотника рыбак, как правило, не видит и не слышит свою жертву. Доступность наземных животных облегчала их одомашнивание. Сельское хозяйство стало бурно развиваться, а аквакультура прививалась очень медленно. Кроме того, поскольку поиск рыбы в океане затруднен, сильно повлиять на численность рыб он не мог (рис. 1.8). Пока запасы значительны, с увеличением промыслового усилия уловы возрастают. После достижения определенной величины промыслового усилия и при дальнейшем его увеличении уловы начинают снижаться из-за сокращения запасов. До последнего времени (последние 50—75 лет) промысел не мог подорвать естественные запасы, поскольку методы поиска рыбы были несовершенны и пополнение превышало естественную и промысловую смертность. За последние 50—75 лет и особенно 25 лет были разработаны более совершенные методы поиска рыбы, позволившие точнее ее обнаруживать и эффективнее облавливать. Эхолоты, спутники и самолеты промысловой разведки — это лишь немногие современные средства, доступные в настоящее время для поиска рыбы. В результате некоторые виды исчезли почти полностью. Поскольку запасы рыб уменьшились, общий улов и вылов на единицу усилия также резко сократились. Некоторые виды находятся под угрозой исчезновения. Водные ресурсы мира огромны (табл. 1.2).

Более 97 % воды сосредоточено в океанах, причем на Тихий океан приходится 51, на Атлантический — 25, на Индийский — 21 %. Ледовый покров Антарктиды пока остается самым большим резервом пресной воды, на втором месте — грунтовые воды. Площадь водной поверхности составляет 71 % площади поверхности суши, поэтому потенциальная площадь воды, с которой можно получать продукцию водных организмов, составляет приблизительно $380,5 \cdot 10^6$ км². Огромные площади океанов и озер непродуктивны и могут считаться биологическими «пустынями» так же, как и некоторые территории континентов. К сожалению, наши знания о продуктивности океанов весьма ограничены. Известно, что глубины океанов совершенно непродуктивны, за исключением районов подъема глубинных вод (апвеллинг) у западного побережья Южной Америки и Африки. Эти районы являются наиболее продуктивными зонами океана. Районы континенталь-



Рис. 1.8. Зависимость улова от промыслового усилия

Таблица 1.2. Мировой запас воды* (Encyclopedia Britannica and Information Please Almanac, 1974)

Вода	Площадь водной поверхности, км ² · 10 ⁶	Объем воды, км ³ · 10 ⁶	% общего объема
Морская			
Атлантический океан (с окраинными морями)	106,46	354,70	25,2
Тихий океан (с окраинными морями)	179,68	723,70	51,4
Индийский океан (с окраинными морями)	74,92	291,90	20,7
Все океаны	361,06	1370,30	97,3
Внутренние моря и соленые озера	0,70	0,10	
Вся морская	361,76	1370,40	97,3
Пресная			
пресноводные озера	0,86	0,13	
все реки (средний уровень)		0,001	
Антарктический лед	15,54	27,09	1,9
Арктический лед и ледники	2,33	2,08	0,1
вода в атмосфере	512,82	0,01	—
грунтовые воды до глубины 0,8 км		4,24	0,3
глубоко залегающие грунтовые воды		4,17	0,3
Вся пресная	531,55	37,72	2,6
Весь запас	893,31	1408,12	99,9

Таблица 1.3. Длина береговой линии и площадь континентального шельфа по континентам (E. Kossinna, 1933)

Континент	Площадь континентального шельфа, км ² · 10 ⁶	Длина береговой линии, км*
Азия	9,38	70 600
Африка	1,28	30 500
Европа	3,11	37 200
Южная Америка	2,43	28 700
Северная Америка	6,74	75 500
Австралия	2,70	19 500
Антарктида	0,36	50 000**
Всего	26,00	312 000

* Исключая острова.

** Длина приблизительная.

ных шельфов также весьма продуктивны. В табл. 1.3 представлены площади континентальных шельфов. Эстуарии рек, где происходит смешение пресных речных вод с морскими, также высокопродуктивны. Продуктивность рек и озер значительно варьирует от совершенно непродуктивных до высокопродуктивных.

Продукция природных водоемов состоит в основном из промысловых уловов (включая водоросли) и спортивных трофеев.

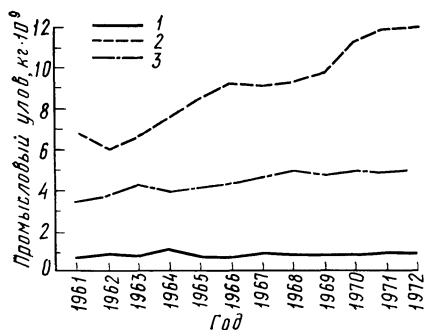


Рис. 1.9. Промысловые уловы различных водных организмов в 1961—1972 гг.:

1 — пресноводные и проходные рыбы; 2 — ракообразные, моллюски и другие беспозвоночные; 3 — водоросли (Production Yearbook, 1973)

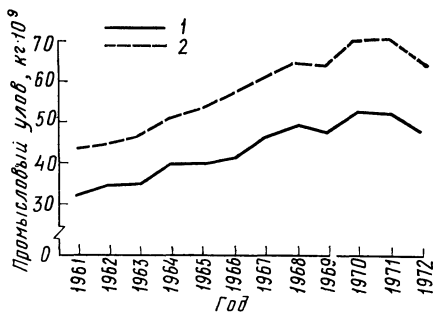


Рис. 1.10. Общий промысловый улов морских рыб и других водных организмов в 1961—1972 гг.:

1 — морские рыбы; 2 — общий улов (Production Yearbook, 1973)

Сведения о спортивных уловах весьма неполные. Данные, полученные из США, показывают, что национальное спортивное рыболовство дает почти столько же рыбы, сколько и промышленное, однако для других стран, возможно, это не совсем справедливо, особенно для слаборазвитых. Кроме того, мировой статистикой спортивные уловы не учитываются. Учетом промысловых уловов занимается ФАО. На рис. 1.9 и 1.10 показаны общие уловы и уловы различных водных организмов и водорослей. За период с 1961 по 1972 г. снижение уловов по сравнению с предыдущим годом наблюдалось только в 1969 и 1972 гг. Снижение общего улова в 1972 г. обусловлено сокращением запаса анчоуса в Перу, которое происходит периодически и связано с изменениями течений у берегов Перу. Уловы не могут бесконечно возрастать. Уже сейчас перелову подверглись многие промысловые виды рыб (см. рис. 1.8). Одним из примеров нерационального ведения промысла является промысел китов, хотя они относятся не к рыбам, а к млекопитающим.

Потенциальный промысловый улов из естественных водоемов зависит от места, которое изымаемый объект занимает в пищевой цепи. Фитопланктон — первое звено пищевой цепи. Зоопланктон потребляет фитопланктон и сам служит пищей для хищников — фильтраторов, которые в свою очередь часто служат кормовыми объектами для более крупных рыб. На рис. 1.11 представлена упрощенная схема пищевой цепи. Потери при переходе к каждому следующему звену пищевой цепи составляют около 90 % исходной биомассы. Лишь 10 % биомассы фитопланктона идет на построение следующего звена пищевой цепи — зоопланктона. На рис. 1.12 показаны потери в каждом звене пищевой цепи. К сожалению, получать урожай с низших звеньев пищевой цепи — фито- и зоопланктона — очень трудно, поскольку они не образуют больших скоплений. В связи с тем, что для сбора фито- и

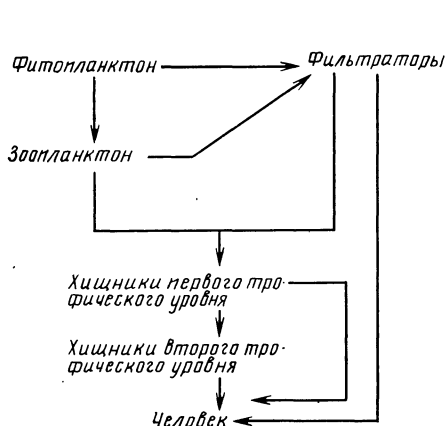


Рис. 1.11. Упрощенная схема пищевой цепи

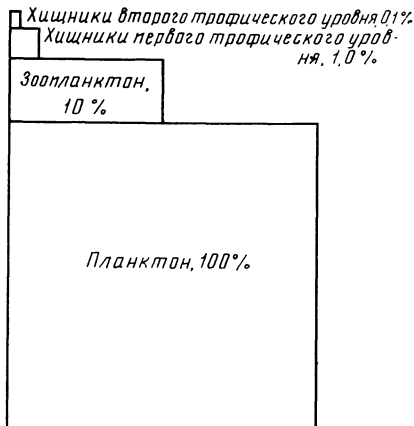


Рис. 1.12. Потери в пищевой цепи

зоопланктона необходимо профильтровывать большие объемы воды, этот процесс считается экономически невыгодным. Кроме того, такая продукция в большинстве стран не нашла бы сбыта. Основными объектами промысла являются представители высших звеньев пищевой цепи, что приводит к большим потерям в весе. Каким же может быть максимальный улов из естественных водоемов? Оценки возможных уловов делаются различными специалистами и организациями и колеблются от $70 \cdot 10^9$ кг/год (в настоящее время) до $510 \cdot 10^9$ кг/год. Многие специалисты оценивают потенциально возможный максимальный улов в $100 \cdot 10^9$ кг/год. При этом подразумевается, что рыбы и беспозвоночные, не образующие больших скоплений и недоиспользуемые промыслом в настоящее время (например, кальмары), будут полностью облавливаться.

На рис. 1.13 показано потребление рыбы на душу населения в мире за период с 1961 по 1972 г. Эти цифры получены путем деления общего улова на численность населения по годам. За этот

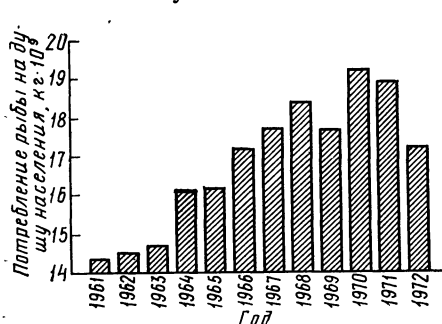


Рис. 1.13. Потребление рыбы на душу населения

двенадцатилетний период потребление рыбы на душу населения в каждый последующий год снижалось по сравнению с предыдущим только в 1969, 1971 и 1972 гг. Общая продукция (см. рис. 1.10) уменьшилась по сравнению с предыдущими годами только в 1969 и 1972 гг. Однако из рис. 1.10 и 1.13 видна наметившаяся тенденция к выравниванию темпов увеличения общего вылова и потребле-

ния рыбы на душу населения. В связи с тем, что величины промыслового усилия во всем мире не снижаются, уловы основных промысловых видов рыб должны приблизиться к максимальным. Уловы недоиспользуемых промыслом видов рыб, очевидно, будут пока возрастать, поэтому, несмотря на огромные водные ресурсы, существует предельная величина вылова. Есть основания считать, что современные уловы, по крайней мере наиболее массовых промысловых рыб, приблизились к максимальным.

АКВАКУЛЬТУРА

Аквакультура — наука и искусство культивирования водных организмов — не новая область человеческой деятельности. В древних государствах Дальнего Востока аквакультурой занимались уже в 500 г. до н. э. О культивировании устриц и других водных организмов писали древнегреческие и римские авторы. К сожалению, аквакультура не развивалась такими же темпами, как сельское хозяйство. Использование научных и технических знаний при культивировании водных организмов сдерживалось по нескольким причинам. Человеку легче было изучить наземных животных и растения, чем водных, поскольку сам человек — наземное существо. В наиболее развитых странах снабжение населения продуктами питания происходило в основном за счет сельского хозяйства, поэтому там, где аквакультура могла бы развиваться, в этом не было необходимости.

Под термином «аквакультура» понимается разведение и выращивание водных организмов. Иногда употребляют и другие термины: «марикультура» или «морское рыбоводство», но они имеют более узкий смысл, поскольку подразумевают работы, проводимые только в морской или солоноватой воде. Аквакультура имеет более широкий смысл, поскольку охватывает все работы, проводимые как в пресной, так и в морской и солоноватой воде. Например, форель и сомик-кошка, которые относятся к пресноводным видам, — наиболее важные объекты аквакультуры в США в настоящее время.

В этой книге под аквакультурой подразумевается получение товарной продукции водных организмов, их обработка, транспортировка и реализация. Под техническими аспектами аквакультуры здесь подразумеваются технические проблемы, возникающие при получении продукции водных организмов, их обработке, транспортировке и сбыте.

Хозяйства аквакультуры можно использовать (Pillay, 1973): для получения пищевой продукции, пополнения естественных запасов путем искусственного воспроизводства и трансплантации, целей спортивного рыболовства, получения наживки для промышленного или спортивного рыболовства, снабжения объектами выращивания и исследования аквариумистов и ученых, очистки воды от органических отходов, получения технической продукции (жемчуг, жир, корм для скота и лекарственные препараты).

Таким образом, с помощью аквакультуры можно получать не только пищевую, но техническую продукцию. Значение таких хозяйств невозможно переоценить. Например, ежегодно США импортирует декоративных рыб на сумму свыше 80 млн. долл. В 1969 г. Япония получила более 100 т жемчуга на сумму свыше 71,5 млн. долл. (Pillary, 1973). В 1973 г. в США было получено более $1,02 \cdot 10^8$ кг рыбьего жира. Всего в США в 1973 г. было получено рыбной продукции на сумму 201,1 млн. долл. (Yearbook of Fishery Statistics, 1973, 1974).

В настоящее время аквакультура является основным источником получения продуктов питания лишь в некоторых районах мира. Мировая продукция аквакультуры в 1970 г. составила $5 \cdot 10^9$ кг (Coastal Aquaculture in Indo—Pacific Region, 1972), в то время как промысловые уловы рыбы в 1970 г. составили $69,58 \cdot 10^9$ кг (см. рис. 1.10), т.е. продукция аквакультуры составила всего 7,2 % общей добычи рыбы. Однако эти данные не дают исчерпывающей картины. С 1961 по 1971 г. уловы ежегодно возрастали, а в 1972 г. произошло значительное снижение уловов (см. рис. 1.10), которое можно объяснить либо сокращением уловов анчоуса у берегов Перу, либо приближением уловов к максимальным для тех видов рыб, которые в настоящее время составляют основу промысла. В табл. 1.4 приведены реальные уловы по океанам и рассчитан-

Таблица 1.4. Уловы морских рыб, ракообразных и головоногих моллюсков в 1970 г. и рассчитанный потенциальный мировой улов по районам (в кг $\cdot 10^6$)

Район	Общий улов в 1970 г.	Рассчитанный по- тенциальный улов	Возможное увели- чение уловов, % улова, 1970 г.
Атлантический океан	20 968	45 700	218
Тихий океан	33 253	55 500	167
Индийский океан	2 724	14 850	545
Средиземное море	910	1 800	198
Весь мировой улов	57 855	117 850	204

ные потенциально возможные уловы. Для сравнения приведены уловы 1970 г. Из таблицы видно, что максимальный устойчивый улов Мирового океана составляет приблизительно $117850 \cdot 10^6$ кг. Поскольку в 1970 г. было выловлено всего $57855 \cdot 10^6$ кг, то теоретически уловы могут возрасти в 2,04 раза по сравнению с уловами 1970 г. (Robinson, 1973). В табл. 1.5 приведены потенциально возможные уловы Мирового океана и рассчитанные потребности населения в рыбных продуктах. К 1980 г. потенциальные возможности будут превосходить реальные уловы всего на 30 %, а к 2000 г. для удовлетворения потребностей населения потребуется весь потенциальный улов.

Таблицы 1.4 и 1.5 не содержат данных по ценным видам рыб. Уже сейчас наблюдаются признаки перелома наиболее важных

Таблица 1.5. Потенциальные ресурсы Мирового океана и рассчитанные потребности (в кг·10⁹ сырого веса) (Robinson, 1973)

	1964/1966	1970	1980	2000
Потребление				
рыбной муки	18,1	26,5	33,3	Нет данных
пищевой продукции	34,2	43,9	61,0	107,5
Общее	52,3	70,4	94,3	
Ресурсы				
океанические	118,0	118,0	118,0	118,0
пресноводные и культивируемые	6,0	10,0	17,0	32,0
Общие	124,0	128,0	135,0	150,0
Недоиспользуемые ресурсы, %	57,8	45,7	30,3	Практически отсутствуют

промысловых объектов. Например, уловы североамериканского палтуса снизились с $34020 \cdot 10^6$ кг в 1962 г. до $18600 \cdot 10^6$ кг в 1972 г. (Philips, 1973). То же самое относится и к другим ценным промысловым видам рыб.

В то же время за последние 10 лет продукция аквакультуры значительно возросла. В табл. 1.6 приведены имеющиеся ограниченные данные по продукции аквакультуры и занятым под нее площадям. В табл. 1.7 показана реальная и рассчитанная на 1980, 1985 и 1990 гг. продукция аквакультуры для США. Эти данные можно сравнить с имеющимися для прошлых лет для сомика-кошки и форели. В 1954 г. в США было получено $(5,4 \div 6,4) \cdot 10^6$ кг форели, а в 1972 г. — уже около $15,9 \cdot 10^6$ кг. В 1954 г. продукция сомика-кошки в США составила всего $0,45 \cdot 10^5$ кг, а в 1973 г. — $226,8 \cdot 10^5$ кг.

Во многих странах мира потенциальные возможности для увеличения продукции аквакультуры такие же, как и в США. В табл. 1.8 представлены данные по продукции аквакультуры для некоторых стран и потенциальные площади, пригодные для аквакультуры. По мере роста численности населения и потребностей в продовольствии аквакультура будет играть все большую роль в обеспечении населения продуктами питания.

Перспективность аквакультуры обусловлена несколькими причинами. Под аквакультуру используется поверхность земного шара, занятая водой. Эта территория, за исключением узкой полосы прибрежной зоны, полностью не используется и поэтому может служить источником получения дополнительной продукции. Поскольку для возделывания новых земель требуются значительные капиталовложения, более экономичным может оказаться развитие аквакультуры. Многие водные организмы очень эффективно превращают корм в белок. Например, при прудовом выращивании для получения 1 кг сомика-кошки требуется 1,5 кг корма. Кормовой коэффициент 1,5 — это минимальная величина в настоящее время

Таблица 1.6. Мировая продукция (в живом весе) (Pillay, 1973)

Страна и территория	Площадь, га	Продукция, кг·10 ³	Страна и территория	Площадь, га	Продукция, кг·10 ³
Костистые рыбы			Филиппины	—	2 500
Китай	700 000	2 240 000	Таиланд	—	2 500
Индия	607 915	480 000	Япония	142**	1 800
СССР	—	190 000	Малайзия	870	250
Индонезия	266 300	141 075	Сингапур	—	120
Филиппины	164 414	94 573	США	—	227*
Таиланд	—	87 764	Всего креветок		14 525
Япония	508	85 000	Устрицы		
Тайвань	39 234	56 185	Япония	3 686**	194 600
США	28 300	48 988*	Корея	5 432**	45 700
Пакистан и Бангладеш	30 780	37 540	Мексика	—	43 500
Малайзия	90 473	25 648	Франция	—	34 200
Венгрия	22 000	19 697	Тайвань	—	12 700
Франция	110 000	23 000	Новая Зеландия	—	10 700
Италия	—	18 000	Австралия	10 420	9 800
Южный Вьетнам	2 500	16 500	США	—	9 072
Югославия	9 747	15 840	Канада	—	4 100
Шри Ланка	10 000	15 000	Португалия	—	2 910
Румыния	6 400	12 000	Испания	—	1 800
Дания	—	11 000	Всего устриц		369 072
Польша	62 791	10 909	Мидии		
Чехословакия	42 798	10 641	Испания	—	109 700
Израиль	4 904	10 220	Франция	—	39 800
Бразилия	—	9 967	Корея	—	16 800
Мексика	12 650	9 026	Италия	—	13 700
Кампучия	—	5 000	Всего мидий		180 000
ГДР	—	3 669	Клемы		
ФРГ	11 824	2 627	Малайзия	—	28 600
Бирма	2 920	1 494	Корея	4 284**	16 800
Заир	4 058	1 406	Япония	—	10 800
Боливия	25 502	1 400	США	—	1 180
Австрия	3 000	780	Тайвань	—	60
Сянган (Гонконг)	629	690	Всего клемов		57 440
Замбия	—	689	Прочие моллюски		
Уганда	410	670	Корея	—	19 700
Мадагаскар	1 280	615	Всего прочих моллюсков		626 212
Норвегия	—	600	Морские водоросли		
Сингапур	890	554	Япония	19 100**	357 000
Нигерия	—	127	Корея	15 122**	16 000
Кения	610	122	Всего морских водорослей		373 000
Испания	—	50	Всего		
Южная Корея	76	40			4 702 898
Гана	204	30			
Пуэрто-Рико	135	25			
Всего костистых рыб	2263 252	3 689 161			
Креветки					
Индия	4 000	3 800			
Индонезия	—	3 328			

* Draft Outline for National Fisheries Plan, 1974.

** Coastal Aquaculture in the Indo-Pacific Region, 1972.

Таблица 1.7 Рассчитанная и потенциальная продукция аквакультуры в США
(National Fisheries Plan, 1974)

Вид	Рассчитанная продукция, кг · 10 ³	Потенциальная продукция, кг · 10 ³		
		1980	1985	1990
Лосось	10 430	29 030	62 596	104 780
Устрицы*	9 070	18 144	45 359	90 718
Креветки (пенеиды)**	227	3 175	10 433	19 505
Креветки (пятнистые)	—	45	454	2 268
Креветки (пресноводные)	2	2 268	4 536	6 804
Северный омар	—	454	2 268	4 540
Клемы с твердыми и мягкими створками	1 180	2 268	4 540	11 340
Морской гребешок	—	227	907	2 268
Морское ушко	—	227	454	2 268
Мидии	—	454	4 540	11 340
Помпано	—	45	227	1 360
Пресноводная форель	15 876	18 144	24 948	31 752
Морская форель	—	454	2 268	4 536
Сомик-кошка	22 679	36 287	45 359	54 431
Раки	4 536	9 071	11 340	13 608
Малоценная рыба	—	1 814	18 144	181 440
Всего	64 000	122 107	238 373	542 958

* Вес мяса со створками.

** Вес с головами.

для домашних животных. Кроме того, многие водные животные способны превращать вещества, содержащиеся в канализационных и других стоках, в ценный белок. Например, при кормлении устриц фитопланктоном, культивируемым на бытовых сточных водах, получается высококачественный продукт. Однако при этом возникают проблемы, связанные с очисткой животных перед их употреблением в пищу.

С помощью аквакультуры можно получать большое количество пищевой продукции из источников, которые до сих пор не использовались. Устрицы и клемы, обитающие в приливо-отливной зоне мелководных прудов, питаются планктоном, приносимым океаническими течениями, сбор которого в настоящее время считается экономически невыгодным, и дают высококачественную пищевую продукцию и строительный материал — створки. Продукция в приливо-отливных прудах может быть получена без больших капиталовложений, за исключением затрат на строительство прудов и сбор урожая. В Южной Каролине в приливо-отливных прудах получают более 2018 кг мяса устриц с 1 га в год. Культивирование любых фильтрующих водных организмов, употребляемых в пищу человеком или домашними животными, позволяет утили-

Таблица 1.8. Продукция аквакультуры и потенциальные площади, пригодные для ее развития в некоторых странах

Страны и территории	Современное состояние		Потенциальные площади	
	Площади под культивированием, га	Продукция, кг·10 ³	Пресноводные водоемы ^д , га	Соленые и солоноватоводные ^е , га
Бангладеш	а	а	4 335 000	166 000 ^ж
Бирма	2 920	1 484	10 957 000	520 000 ^ж
Кампучия	—	—	—	50 000 ^з
Шри Ланка	10 000	15 000	438 000	140 000 ^ж
Индия	607 915	480 000	67 730 000	2 000 000 ^ж
Индонезия	266 300	141 075	4 787 000	6 000 000 ^ж
Малайзия	90 473	25 648	422 150 ^б	ж
Пакистан	30 780	37 540	682 000 ^б	ж
Филиппины	164 414	94 573	853 063	381 412 ^ж
Южная Корея	10 000	99 040 ^в	319 754	232 000 ^ж
Тайвань	39 234	56 185	533 000	53 871 ^ж
Таиланд	—	87 764	6 077 434	166 000 ^ж
Вьетнам	2 600 ^г	—	—	150 000 ^з
Всего	1 224 636	1 038 309	97 134 401	9 859 283

а Данные по площадям, занятым под культивирование, и продукции аквакультуры включены в соответствующие данные для Пакистана.

б В том числе солоноватые и морские болота и другие затопляемые земли.

в Рассчитано по данным работы Пиллари.

г Учтены только площади береговых хозяйств аквакультуры.

д Включая болота и затопляемые земли, мелкие водоемы и орошаемые рисовые поля.

е Включая соленые и солоноватые болота и другие затопляемые земли.

ж Pillary, 1973.

з Coastal Aquaculture in the Indo-Pacific Region, 1972.

зирать планктон. Непосредственный сбор планктона пока считается экономически невыгодным.

Эффективность аквакультуры зависит от опыта и затраченных усилий. Например, выпуск молоди лосося в море и отлов взрослых особей спустя несколько лет не даст такой же продукции на единицу водной поверхности, какую дает культивирование лосося от икры до товарного веса в хозяйствах. В табл. 1.9 показана продукция, которую можно получить при использовании различных методов культивирования водных организмов в хозяйствах разных типов. Данные табл. 1.9 позволяют сделать следующие выводы: в хозяйствах аквакультуры можно получать столько же или даже больше продукции, чем в сельском хозяйстве; естественные водоемы менее продуктивны, чем окультуренные; дополнительное кормление позволяет увеличить продукцию; в проточных водоемах урожай с единицы водной поверхности больше, чем в непроточных.

Т а б л и ц а 1.9. Продукция водных организмов в различных водоемах

Водоемы, пруды и продукция	Ежегодная продукция, кг/га	Источник
Естественные водоемы		
альпийские озера Швейцарии и ФРГ	1,3—14,5	1
пресноводные водоемы Англии и Уэльса	23	2
оз. Мандота, штат Висконсин (США)	25	2
оз. Накивали, Уганда	188	2
оз. Круангири, Танзания	316	2
оз. Вобеза, штат Висконсин (США)	448	2
солончатководные пруды, Филиппины	500—1000	1
Северное море	10	1
Баренцево море	24	1
Исландия	55	1
Перу	448	1
Удобряемые пруды		
ФРГ	225—450	2
Югославия	410	2
штат Алабама, США	450—675	1
Израиль	2120—2625	1
Китай	3140—6725	1
Заир	2800—11200	1
Продукция		
Пресноводные пруды		
неудобряемые	50—1125	3
удобряемые	170—1700	3
удобряемые, со сточными водами	2450—5600	3
удобряемые, с дополнительным кормлением	11250—17950	3
Солончатководные пруды	450—2250	3
Проточные пруды		
для форели	11200—78500	3
для карпа и сомика-кошки	До 1125000	3
Продукция наземных животных (для сравнения)		
говядина, баранина	225	
свинина	560	

1. Orr and Marshall, 1969.
2. Hickling, 1962.
3. Mihursky, 1969.

Статистика учитывает продукцию аквакультуры по массе или по весу на единицу площади водной поверхности (см. табл. 1.9), или по массе или весу на единицу объема воды. Второй вариант более надежен. Например, ежегодная продукция рыбы в проточной системе составляет более 1 млн. кг/га, как показано в табл. 1.9. Очевидно, для получения такой продукции по системе должна пропускаться огромная масса воды. Поскольку при использовании интенсивных методов выращивания основные затраты приходятся на перекачивание воды, основное значение имеет объем воды, а

не площадь поверхности. То же самое относится к измерению первичной продуктивности естественных водоемов. Продукция на единицу объема — постоянная величина, в то время как продукция на единицу площади поверхности зависит от высоты столба воды. Поскольку в океанографии высота столба воды может колебаться от метра и менее до нескольких тысяч метров, продуктивность может значительно варьировать. Продуктивность с глубиной изменяется, и это необходимо учитывать при любых осредненных измерениях, сделанных по объему.

Учитывая, что более 71 % поверхности Земли занято водой, высокий темп роста и низкие кормовые коэффициенты многих водных организмов позволяют рассчитывать на быстрое развитие аквакультуры. В настоящее время водная среда дает всего около 3 % общей пищевой продукции (Desrosier, 1961), а из них на долю аквакультуры приходится всего 0,2 %. Однако многие продукты, получаемые из водной среды, непосредственно в пищу человеку не используются. Например, сельдь (менхеден), которую вылавливают в США в больших количествах, чем любую другую рыбу, в пищу населению не идет. Именно поэтому водные животные имеют гораздо большее значение, чем может показаться на первый взгляд. Аквакультура может стать важным источником дополнительного белка.

Развитие аквакультуры лимитируется несколькими факторами, прежде всего недостатком научных и технических знаний, позволяющих создавать рентабельные хозяйства для культивирования гидробионтов. Имеющаяся информация не систематизирована, а технические решения не всегда учитывают специфику аквакультуры.

В этой книге автор попытался обобщить большое число сведений, накопленных к настоящему времени, и дать подходы к решению проблем, с которыми приходится сталкиваться рыбоведам-практикам, исследователям, студентам и вообще всем тем, кто связан с аквакультурой.

REFERENCES

Bardach, John E., John H. Ryther, and William O. McLarney (1972). *The Farming and Husbandry of Freshwater and Marine Organisms*. Wiley-Interscience, New York.

Coastal Aquaculture in the Indo-Pacific Region, T. V. R. Pillay, Ed. (1972). Fishery Resources Division, Department of Fisheries, Food and Agricultural Organization of the United Nations, Rome. Published by Fishing News (Books) Ltd., London.

Coale, A. J. (1974). The History of the Human Population. *Scientific American* 231 (3): 40—51.

Demeny, P. (1974). The Populations of the Underdeveloped Countries. *Scientific American* 231 (3): 148—159.

Desrosier, Norman W. (1961). *Attack on Starvation*. AVI, Westport, Conn.

Draft Outline for the National Fisheries Plan (1974). National Marine Fisheries Service, National Oceanographic and Atmospheric Administration, U. S. Department of Commerce, Washington, D. C.

Encyclopedia Britannica, Macropaedia (1974). William Benton Publisher, Chicago.

Fisheries of the United States, 1973 (1974). Current Fishery Statistics No. 6400: National Marine Fisheries service, National Oceanographic and Atmospheric Administration, U. S. Department of Commerce, Washington, D. C.

Freedman, Ronald and Bernard Berelson (1974). The Human Population. Scientific American 231 (3): 31—39.

Hickling, C. F. (1962). Fish Culture. Faber & Faber, London.

Information Please Almanac Atlas and Yearbook, Dan Golenpaul, Ed. (1974). Dan Golenpaul Associates, New York.

Kossinna, E. (1933). Die Erdoberfläche. Handbuch der Geophysik.

Mihursky, J. A. (1969). On Using Industrial and Domestic Waste in Aquaculture. Agricultural Engineering Journal 50 (II): 667—669.

Milne, P. H. (1972). Fish and Shellfish Farming in Coastal Waters. Fishing News (Books) Ltd., London.

Orr, A. P. and S. M. Marshall (1969). The Fertile Sea. Fishing News (Books) Ltd., London.

Philips, Richard H. (1973). United States Halibut Industry in Trouble. National Fisherman, November 1973, p. 6-A.

Pillary, T. V. R. (1973). The Role of Aquaculture in Fishery Development and Management. Journal of the Fisheries Research Board of Canada 30: 2202—2217.

Production Yearbook, 1972 (1973). Vol. 35 Food and Agricultural Organization of the United Nations, Rome.

Revelle, Roger (1974). Food and Population. Scientific American 231 (3): 161—170.

Robinson M. A. (1973). Determinants of Demand for Fish and Their Effects upon Resources. Journal of the Fisheries Research Board of Canada 30: 2051—2058.

The State of Food and Agriculture (1973). Food and Agricultural Organization of the United Nations, Rome.

White House Report (1967). The World Food Problem, Panel on the World Food Supply, President's Science Advisory Committee 2: 345—355.

Yearbook of Fishery Statistics (1973). Vol. 35. Food and Agricultural Organization of the United Nations, Rome.

Глава 2. СВОЙСТВА ВОДЫ

Вода является средой обитания водных организмов, поэтому все необходимое для жизни они должны добывать из воды или из содержащихся в ней примесей. Роль воды в аквакультуре очень велика, ее физические и химические характеристики имеют исключительно важное значение. К счастью, вода обладает некоторыми специфическими свойствами, которые делают ее исключительно благоприятной в качестве среды обитания.

ХИМИЧЕСКАЯ СТРУКТУРА

Химически молекула воды состоит из одного атома кислорода и двух атомов водорода, связанных между собой таким образом, что каждый из атомов водорода делится своим единственным электроном с кислородным атомом. Такая связь называется ковалентной. Атомы водорода расположены под углом $104,5^\circ$ по отношению к атому кислорода, поэтому молекула воды полярна. Более крупный и обладающий большим положительным зарядом атом кислорода притягивает электроны сильнее, чем атомы водо-

рода, поэтому кислородная сторона молекулы имеет определенный отрицательный заряд, а водородная — положительный. Таким образом, высокая диэлектрическая постоянная воды (80,37 при 20°C) обусловлена полярностью молекул (Handbook of Chemistry and Physics, 1969).

Многие аномальные свойства воды являются следствием большого числа водородных связей между ее молекулами или кристаллами льда. Молекулы соединений, в которых водород ковалентно связан с такими высокоэлектроотрицательными элементами малого размера, как кислород, фтор и азот, образуют прочные межмолекулярные связи. В таких молекулах электроотрицательные атомы проявляют сильное сродство к электрону, в результате чего атом водорода приобретает эффективный положительный заряд. Положительно заряженный водород стремится притянуть электроны другого атома, в результате чего образуется водородная связь. Высокая прочность водородных связей из-за отсутствия экранирующих электронов и малого размера атома приводит к тому, что атом водорода притягивает электроотрицательную молекулу. Во льду каждый атом водорода образует одну водородную связь с атомом кислорода. Образующаяся в результате кристаллическая структура имеет пустоты, уменьшающие плотность льда. Когда лед начинает таять, некоторые водородные связи разрываются, кристаллическая структура (с пустотами) разрушается и плотность увеличивается. Результатом этого является очень важное свойство: холодная вода тяжелее льда. Еще одно важное следствие наличия водородной связи — аномально высокие значения точки кипения, теплоты парообразования, теплоты плавления и вязкости.

ЖЕСТКОСТЬ

Имеющиеся в большинстве руководств и справочников описания свойств воды относятся в основном к чистой воде, не содержащей примесей. Вода, используемая в системах для культивирования водных организмов, обычно не бывает чистой. В ней содержатся различные растворенные и взвешенные вещества, которые в разной степени могут изменять свойства воды в зависимости от концентрации и собственных химических характеристик. Определение качественного и количественного состава вод каждого источника практически невозможно, так как природные источники весьма отличаются друг от друга, кроме того, концентрации примесей в любом водном источнике могут меняться со временем, поэтому были выбраны определенные параметры, определяющие основные характеристики вод. К ним относятся жесткость, щелочность и соленость.

Понятием жесткости обычно пользуются при характеристике пресных вод. Первоначально под жесткостью понимали способность воды осаждать мыло. В этом процессе обычно участвуют ионы кальция и магния. Ионы алюминия, железа, марганца,

стронция, цинка и другие поливалентные ионы, а также ионы водорода тоже могут осаждать входящие в состав мыла компоненты*. Чем жестче вода, тем больше мыла необходимо для получения определенного моющего эффекта. Однако жесткость имеет и более широкое значение. Поскольку в большинстве случаев жесткость воды почти целиком обусловлена присутствием кальция или магния, ее определяют как общую концентрацию этих ионов в виде карбоната кальция. Однако, если ионы других металлов присутствуют в значительном количестве, их также учитывают при определении жесткости.

Под щелочностью воды понимается способность воды принимать протоны (Standard Methods, 1971). Щелочность обычно обусловлена присутствием в природных водах карбонатов, бикарбонатов и гидроксидов. Если жесткость численно превышает суммарную карбонатную и бикарбонатную щелочность, различают карбонатную и некарбонатную жесткость. Карбонатная жесткость эквивалентна общей щелочности, разница между ними представляет собой некарбонатную жесткость. Если жесткость численно равна или меньше суммы карбонатной и бикарбонатной щелочности, то некарбонатная жесткость отсутствует (Standard Methods, 1971).

По классификации геологической службы США природные воды по жесткости делятся на четыре класса. Из табл. 2.1 видно, что в эту классификацию входят только пресные воды.

Таблица 2.1 Классификация вод по жесткости

Класс	Жесткость		
	Степень	мг/л	г/л
1-й	Мягкая	0—55	0—0,055
2-й	Незначительно жесткая	56—100	0,056—0,1
3-й	Умеренно жесткая	101—200	0,101—0,2
4-й	Очень жесткая	201—500	0,201—0,5

Методы определения жесткости достаточно известны (Standard Methods, 1971) и в данной работе не рассматриваются.

СОЛЕНОСТЬ

Для характеристики солоноватых и морских вод (в данной книге и те и другие отнесены к соленым водам) необходим параметр, отражающий концентрацию неорганического вещества. Таким параметром может служить соленость. Соленость определяется как общее количество твердого вещества, выделенного из 1 т

* Ионы водорода нейтрализуют щелочи мыла, а не осаждают его компоненты.—
Прим. ред.

морской воды, когда все карбонаты превращены в окислы; бром и иод замещены хлором, а органическое вещество полностью окислено. Соленость природных вод может колебаться от 0 до 40 ‰. Соленость морских вод составляет, как правило, 33—37 ‰, в среднем примерно 35 ‰. В некоторых закрытых водоемах таких, как Большое Соленое озеро в штате Юта или Мертвое море, соленость значительно превышает 40 ‰.

Одним из важнейших законов морской химии является закон постоянства основного солевого состава, который гласит, что отношение концентрации каждого из элементов основного солевого состава к концентрации всего твердого минерального вещества, растворенного в морской воде, остается постоянным. Эта зависимость имеет большое значение, так как позволяет определять соленость по концентрации одного из присутствующих ионов, что значительно упрощает процедуру анализа. Поскольку на долю хлоридов приходится около 55 % общего количества растворенных солей, соленость определяют по содержанию хлор-иона. По определению хлорность — это число (в ‰), равное массе серебра в грамм-атомах, необходимой для осаждения галогенов, содержащихся в 0,3285233 кг морской воды. Такое определение позволяет преодолеть трудности, связанные с изменением атомного веса серебра, значение которого неоднократно уточнялось. На практике соленость определяют титрованием определенного объема воды стандартным раствором азотнокислого серебра в присутствии индикатора. Галогены при этом осаждаются, и, когда все они оказываются связанными, цвет раствора изменяется. По количеству азотнокислого серебра можно рассчитать хлорность, а затем с помощью формулы Кнудсена [уравнение (2.1)] по хлорности определить соленость:

$$S = 0,30 + 1,8050 Cl, \quad (2.1)$$

где S — соленость, ‰; Cl — хлорность, ‰.

Фофонов предложил другую формулу, связывающую соленость с хлорностью [уравнение (2.2)]:

$$S = 1,80655 Cl. \quad (2.2)$$

Формула Фофонова была получена по данным, аналогичным данным Кнудсена, но в предположении, что морская вода смешана с практически неминерализованной водой. Это позволило освободиться от свободного члена при незначительном увеличении наклона прямой на графике (Tsurikova and Tsurikov, 1971). Поскольку большинство таблиц солености рассчитано по формуле Кнудсена [уравнение (2.1)], она использована и в данной работе*.

Титрование по ряду причин предпочтительнее прямого метода определения солености выпариванием соленой воды с последую-

* Кроме того, предположение Фофонова неприменимо для процессов смешения морских и речных вод. — *Прим. ред.*

щим взвешиванием сухого остатка. Техника выпаривания весьма трудоемка и связана со значительными затратами времени. Для удаления органического вещества необходимо нагреть полученный сухой остаток до температуры 480—500 °С. При этом происходят изменения химического состава, а часть солей разлагается. В результате по весу сухого остатка можно получить неверное представление о солености.

Помимо титрования существуют и другие методы определения солености. В настоящее время наиболее широкое распространение получил метод определения солености по электропроводности и температуре воды. Уравнение (2.3) характеризует связь электропроводности R (в мкОм) с соленостью (в ‰) при 15 °С (Tsurikova and Tsurikov, 1971):

$$S = 0,08996 + 28,29720R_{15} + 12,80832R_{15}^2 - 10,67869R_{15}^3 + 5,98624R_{15}^4 - 1,32311R_{15}^5. \quad (2.3)$$

При значениях температуры, отличных от 15 °С, в величину измеренной электропроводности необходимо вводить температурную поправку, которая вычисляется по уравнению (2.4) (International Oceanographic Tables, 1966):

$$\Delta_{15}^{(t)} = R_{15} - R_t = R_t(R_t - 1)(T - 15)[96,7 - 72,0R_t + 37,3R_t^2 - (0,63 + 0,21R_t^2)(T - 15)], \quad (2.4)$$

где R_{15} — электропроводность при 15 °С; R_t — электропроводность при температуре T ; T — температура, °С.

На практике это уравнение используется редко, так как приборы для определения солености (солемеры) оборудованы встроенными автоматическими температурными компенсаторами.

Теоретически, используя изложенные выше методы, можно определить соленость различных вод — от глубинных океанических до пресных. Однако при определении солености эстуарных вод требуется осторожность и тщательность, поскольку в этом случае возможны отклонения от закона постоянства основного солевого состава. Присутствие в водах эстуариев некоторых органических соединений влияет на электропроводность и результаты химического анализа. Все это может привести к ошибкам при определении солености.

СКРЫТАЯ ТЕПЛОТА ПАРООБРАЗОВАНИЯ

Скрытая теплота парообразования (испарения) — это энергия, необходимая для испарения единицы массы какого-либо вещества при постоянной температуре. Для воды при температуре 100 °С и давлении 1 ат скрытая теплота парообразования составляет 2,258 кДж/г (Handbook of Chemistry and Physics, 1958). Столь высокое значение объясняется наличием водородных связей. Каждая молекула воды связана водородными связями с дву-

мя другими молекулами. Чтобы разорвать соответствующее числу Авогадро количество водородных связей ($6,0235 \cdot 10^{23}$), необходимо затратить 20,3 кДж энергии. Поскольку каждая молекула имеет две водородные связи, для испарения (разрыва водородных связей) одной грамм-молекулы воды требуется 40,6 кДж. Действительно, если для испарения 1 г воды требуется 2,258 кДж, а масса одной грамм-молекулы воды составляет 18 г, то

$$(2,258 \text{ кДж/г})(18 \text{ г}) = 40,6 \text{ кДж.}$$

Это подтверждает важную роль водородных связей в формировании физико-химических свойств воды.

Скрытая теплота парообразования морской воды такая же, как и пресной. Вещества, попадающие в воду в результате функционирования систем для культивирования водных организмов, практически не влияют на эту характеристику.

СКРЫТАЯ ТЕПЛОТА ПЛАВЛЕНИЯ

Скрытая теплота плавления — это количество теплоты, потребляемое веществом при переходе из твердого состояния в жидкое при постоянной температуре. Скрытая теплота плавления воды 333,6 Дж/г при температуре замерзания 0°C (Handbook of Chemistry and Physics, 1958). При подведении ко льду теплоты движение молекул ускоряется и часть водородных связей разрывается. Чтобы лед превратился в воду, достаточно разорвать 15 % водородных связей (Reid, 1961). Разрыв оставшихся водородных связей объясняет высокие значения удельной теплоемкости и теплоты парообразования воды.

Примеси, присутствующие в воде, изменяют температуру замерзания, а также непосредственно влияют на скрытую теплоту плавления. Увеличение солёности приводит к понижению температуры замерзания. Брац (Brahtz, 1968) вывел следующую зависимость между понижением точки замерзания и хлорностью (показателем солёности):

$$\text{FPL} = -0,0966 \text{ Cl} - 0,0000052 (\text{Cl})^2, \quad (2.5)$$

где FPL — понижение точки замерзания, $^\circ\text{C}$; Cl — хлорность, ‰.

Таким образом, с увеличением солёности (или хлорности) температура замерзания морской воды понижается. Брац определил эту зависимость как нелинейную. Боудич (Bowditch, 1966), однако, полагает, что температура замерзания связана с солёностью линейной зависимостью (рис. 2.1). Расхождение весьма незначительно, так как коэффициент при кубическом члене в уравнении (2.5) очень мал.

Органические и неорганические примеси, попадающие в воду, обычно понижают температуру замерзания. Общий эффект зависит от их состава и концентрации в воде. Данные о влиянии на температуру замерзания распространенных водных смесей и раст-

воров содержатся в различных справочниках (например, Handbook of Chemistry and Physics, 1969).

Непосредственное влияние примесей на скрытую теплоту плавления довольно трудно поддается объяснению. Например, теплота плавления морского льда 226 Дж/г при температуре замерзания $-1,7^{\circ}\text{C}$ (Handbook of Chemistry and Physics, 1958). Если бы уменьшение теплоты плавления полностью определялось понижением точки замерзания, то теплота плавления составляла бы примерно 295 Дж/г. Очевидно, теплота плавления каким-то образом непосредственно связана с наличием примесей.

УДЕЛЬНАЯ ТЕПЛОЕМКОСТЬ

Удельная теплоемкость — это количество энергии, необходимое для повышения температуры единицы массы вещества на один градус. Поскольку калория — это количество энергии, необходимое для нагревания 1 г воды с $14,5$ до $15,5^{\circ}\text{C}$, удельная теплоемкость воды при постоянном давлении (C_p) равна $1 \text{ кал}/(\text{г} \times ^{\circ}\text{C})$, или $4,186 \text{ Дж}/(\text{г} \cdot ^{\circ}\text{C})$.

Удельная теплоемкость воды исключительно велика, лишь немногие вещества (среди них аммиак) обладают более высокой теплоемкостью. Добавление примесей уменьшает удельную теплоемкость воды. Брац (1968) установил следующее соотношение между удельной теплоемкостью при постоянном давлении и соленостью морской воды при 0°C и давлении 1 ат:

$$C_p = 1,005 - 0,004136S + 0,0001098S^2 - 0,000001324S^3, \quad (2.6)$$

где C_p — удельная теплоемкость при постоянном давлении, $\text{кал}/(\text{г} \cdot ^{\circ}\text{C})$; S — соленость, ‰.

Удельная теплоемкость при постоянном объеме может быть вычислена по следующей формуле (Brahtz, 1968):

$$C_v = C_p - \frac{T_e}{\rho K_1 j_1}, \quad (2.7)$$

где C_v — удельная теплоемкость при постоянном объеме; T — температура, $^{\circ}\text{C}$; e — коэффициент теплового расширения; ρ — плотность; K_1 — коэффициент сжимаемости; j_1 — механический эквивалент теплоты.

Высокая удельная теплоемкость воды как среды обитания имеет большое значение. Например, температура воды более постоянна, чем температура воздуха, и изменяется довольно медленно.

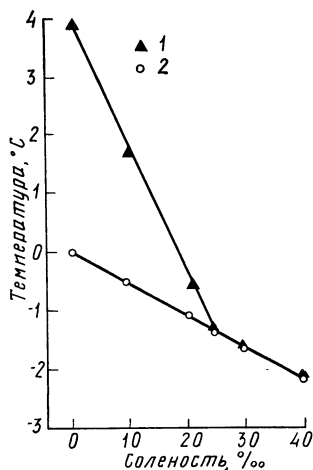


Рис. 2.1. Температуры максимальной плотности и точки замерзания вод различной солености (Bowditch, 1966):

1 — температура максимальной плотности, $^{\circ}\text{C}$; 2 — точка замерзания

Это очень важно для процессов фотосинтеза и насыщения воды кислородом. Более подробно значение теплоемкости будет продемонстрировано в следующих главах.

ПЛОТНОСТЬ

Плотность воды оказывает большое влияние на циркуляцию и круговорот элементов в водных системах. Они в свою очередь воздействуют на биологические организмы, а также играют важную роль в формировании погоды. Плотность воды является функцией температуры (рис. 2.2). Максимальная плотность чистой воды достигается при температуре $3,98^{\circ}\text{C}$. В точке замерзания происходит разрыв функции и плотность резко снижается, поэтому лед легче воды и плавает. Если бы плотность воды не зависела от температуры, озера промерзали бы до дна и многие из них полностью никогда не оттаивали бы, что имело бы катастрофические последствия для живых организмов.

Внесение в воду неорганических солей изменяет температуру, при которой достигается максимальная плотность, и температуру замерзания (см. рис. 2.1). С увеличением солёности температура, при которой плотность максимальна, снижается до тех пор, пока при солёности $24,7\text{‰}$ она не совпадает с температурой замерзания.

Поскольку соли, взвеси и другие примеси плотнее воды, добавление их к воде приводит к увеличению ее плотности. Например, морская вода солёностью 35‰ имеет плотность $1,028\text{ г/см}^3$, в то время как плотность чистой воды 1 г/см^3 . На рис. 2.3 показано непосредственное влияние температуры и солёности на плот-

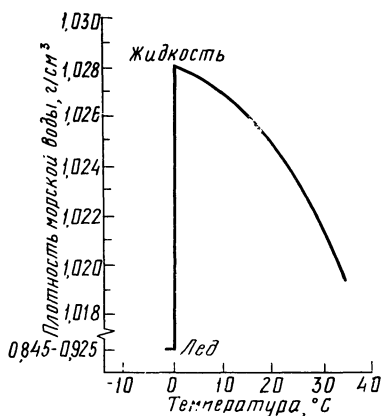


Рис. 2.2. Зависимость плотности воды от температуры (Handbook of Chemistry and Physics, 1958)

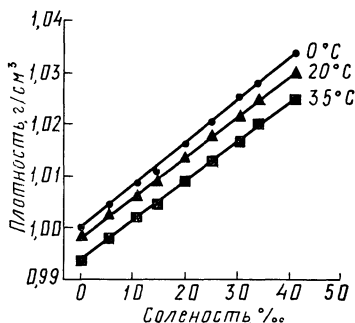


Рис. 2.3. Влияние температуры на плотность соленой воды (Handbook of Chemistry and Physics, 1958; International Critical Tables, 1928)

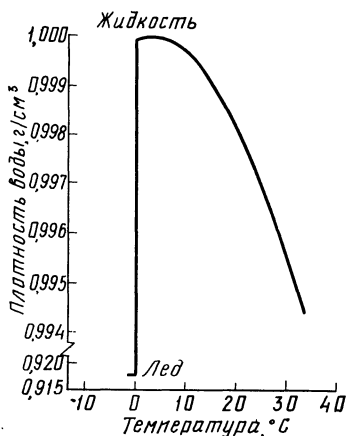


Рис. 2.4. Зависимость плотности морской воды (соленость 35 ‰) от температуры (Rawson and Tupper, 1968; Bowditch, 1966)

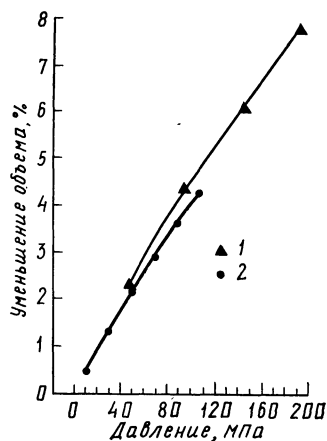


Рис. 2.5. Сжимаемость пресной и морской воды (Hobaica, 1964; Mechanical Engineer's Handbook, 1941; International Critical Tables, 1928): 1 — пресная вода; 2 — морская вода при 0°C и 35 ‰

ность морской воды: с увеличением солености и уменьшением температуры плотность возрастает.

Морская вода имеет наибольшую плотность при температуре замерзания (рис. 2.4). Следовательно, лед, образованный морской водой, должен погружаться и оседать на дне океанов. К счастью, этого не происходит, так как по мере замерзания вода и соли разделяются. Образовавшийся лед почти не содержит солей и поэтому легче морской воды. Воды, находящиеся в непосредственной близости от формирующегося льда, имеют более высокую соленость, чем окружающие, поскольку в них концентрируются выделяющиеся из льда соли.

Кроме температуры и солености на плотность воды влияет и давление (рис. 2.5). Как и следовало ожидать, с увеличением давления плотность возрастает. Однако воду можно считать несжимаемой жидкостью (исключение составляют только случаи проведения работ на больших глубинах), так как при давлении 40 МПа ее объем уменьшается всего на 2 %. Следовательно, в большинстве работ по аквакультуре воду можно рассматривать как несжимаемую жидкость.

Разность плотностей — основная движущая сила круговорота в пресноводных системах и вертикальной циркуляции в океанах. Поскольку плотность является функцией температуры и солености, эти параметры оказывают большое влияние на среду обитания живых организмов. Роль плотности в водных системах более подробно освещена в последующих главах.

ВЯЗКОСТЬ

Вязкость воды — это степень сопротивления жидкости сдвигу*. Количественное выражение для вязкости можно получить из рис. 2.6. К пластине 1 приложена сила F , заставляющая ее перемещаться со скоростью v вдоль пластины 2. Пластины 1 и 2 разделены слоем жидкости толщиной y . Силе F противостоит сопротивление жидкости сдвигу. Сила, необходимая для сдвига жидкости, прямо пропорциональна площади жидкости, которую необходимо сдвинуть (эта площадь равна площади пластины 1 на рис. 2.6), и скорости сдвига (предполагая, что жидкость ньютоновская**). Кроме того, чем больше слой жидкости, тем меньшую силу необходимо приложить:

$$F = \mu A v / y, \quad (2.8)$$

где F — сила; v — скорость движения пластины 1; A — площадь пластины 1; y — толщина слоя жидкости; μ — коэффициент пропорциональности.

Тангенциальное напряжение τ — это сила, приложенная к единице площади:

$$\tau = F/A. \quad (2.9)$$

Подставляя выражение (2.8) в уравнение (2.9), получаем

$$\tau = \mu (v/y).$$

Скорость сдвига в любой точке слоя часто является функцией y , поэтому отношение v/y в более общем виде записывается в дифференциальной форме dv/dy .

$$\tau = \mu (dv/dy). \quad (2.10)$$

Коэффициент пропорциональности μ называется вязкостью. Вязкость различных жидкостей неодинакова и зависит от температуры жидкости: вязкость патоки больше, чем воды, но горячая патока менее вязкая, чем холодная.

Коэффициент пропорциональности μ часто называют динамической или абсолютной вязкостью и выражают в паскаль-секундах (Па·с) или ньютон-секундах на квадратный метр (Н·с/м²). Абсолютная вязкость, деленная на плотность жидкости ρ , называется кинематической вязкостью:

$$\nu = \mu/\rho. \quad (2.11)$$

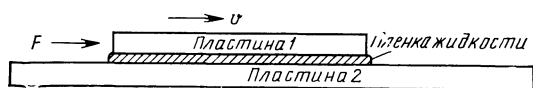


Рис. 2.6. Две плоские пластины, скользящие одна по другой и разделенные пленкой жидкости

* Сдвигом называется такое движение, при котором плоскости жидкости, параллельные элементу поверхности, скользят, как жесткие, друг над другом. — Прим. ред.

** Ньютоновская жидкость — это такая жидкость, для которой точно выполняется линейное соотношение между напряжением и деформацией. — Прим. ред.

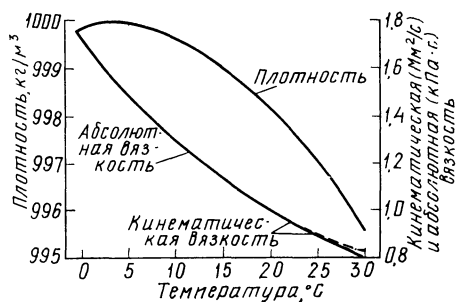


Рис. 2.7. Зависимость свойств воды от температуры при атмосферном давлении (Handbook of Chemistry and Physics, 1969; Handbook of Tables for Applied Engineering Science, 1970)

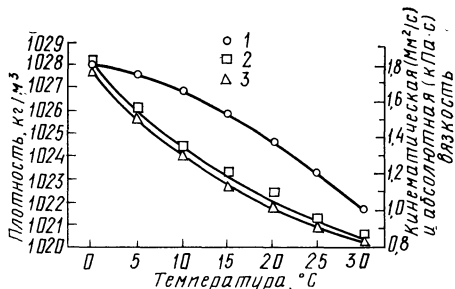


Рис. 2.8. Зависимость свойств морской воды от температуры при атмосферном давлении (Rawson and Tupper, 1968):

1 — плотность; 2 — кинематическая вязкость; 3 — абсолютная вязкость

На рис. 2.7 и 2.8 показаны зависимости плотности, абсолютной и кинематической вязкости пресной и морской воды от температуры. Ни один из этих параметров как для пресной, так и для морской воды не связан линейно с температурой. Вязкость увеличивается с понижением температуры. То же самое относится и к плотности, за исключением пресной воды при температуре ниже $3,98^{\circ}\text{C}$. Таким образом, при движении в холодной воде рыбе приходится затрачивать больше энергии, чем в теплой (при одинаковой скорости). Кроме того, приведенные выше факторы несколько увеличивают затраты на перекачивание воды при уменьшении температуры, так как одновременно увеличиваются и вязкость, и плотность.

ТЕПЛОПРОВОДНОСТЬ

Передача теплоты — это перенос энергии через вещество или комбинацию веществ из области высоких температур в область низких температур. Отсюда легко вывести основной закон передачи теплоты в одну сторону. На рис. 2.9 показано тело с участком высоких температур в левой части и участком низких температур — в правой. Площадь поперечного сечения плоскопараллельной пластины A , ее толщина $(x_i - x_0)$, разность температур между сторонами пластины $T_i - T_0$. Поток теплоты через пластину

$$E_h = KA(T_i - T_0)/(x_i - x_0), \quad (2.12)$$

где E_h — поток теплоты, K — коэффициент пропорциональности; A — площадь.

Поскольку величины $T_i - T_0$ и $x_i - x_0$ могут быть сколь угодно малыми, уравнение (2.12) принимает вид

$$E_h = KA(dT/dx). \quad (2.13)$$

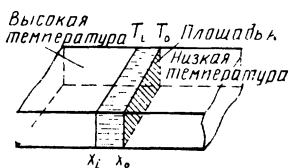


Рис. 2.9. Передача теплоты в твердом теле

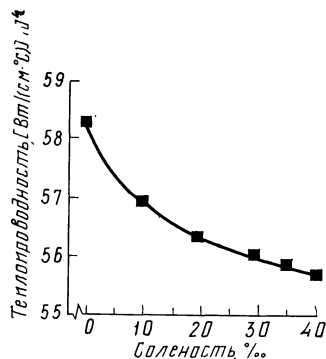


Рис. 2.10. Зависимость теплопроводности морской воды при температуре 17,5°С от солености (International Critical Tables, 1929)

Коэффициент пропорциональности K называется теплопроводностью и измеряется в ваттах на сантиметр-градус Цельсия [Вт/(см·°C)].

Теплопроводность пресной и соленой воды при температуре 17,5°С показана на рис. 2.10: с увеличением давления и температуры теплопроводность возрастает (Bowditch, 1966). Теплопроводность водных систем очень низка, поэтому неподвижная вода является хорошим теплоизолятором. Однако поскольку вода постоянно циркулирует, основным способом передачи тепла является конвекция, отодвигающая теплопроводность на второй план. Низкой теплопроводностью и значительным конвективным переносом тепла объясняются многие особенности водных систем, например четко выраженная океаническая циркуляция. Благодаря конвекции океаны действуют как огромные тепловые насосы, передающие энергию от экватора к полюсам.

ПОВЕРХНОСТНОЕ НАТЯЖЕНИЕ

Молекулы, находящиеся на границе между жидкостью и газом или между двумя жидкостями, испытывают неодинаковое притяжение, которое проявляется в виде поверхностного натяжения. Поверхностное натяжение зависит от температуры и солености: с увеличением солености оно возрастает, с увеличением температуры — уменьшается. Зависимость поверхностного натяжения от температуры и хлорности выражается следующей зависимостью (Bowditch, 1966):

$$ST = 75,64 - 0,144T + 0,0399Cl, \quad (2.14)$$

где ST — поверхностное натяжение, дин/см или 10^{-5} Н/см; T — температура, °C; Cl — хлорность, ‰.

Подставив выражение (2.1) в уравнение (2.14), можно непосредственно связать поверхностное натяжение с соленостью:

$$\begin{aligned} ST &= 75,64 - 0,144T + \\ &+ 0,0399(0,554S - 0,166); \\ ST &= 75,64 - 0,144T + 0,0221S - \\ &- 0,00662; \\ ST &= 75,63 - 0,144T + 0,0221S, \end{aligned} \quad (2.15)$$

где S — соленость, ‰.

Уравнение 2.15 показывает, что поверхностное натяжение возрастает с увеличением солености и понижением температуры, причем температура влияет на него в большей степени, чем соленость (рис. 2.11).

Поверхностное натяжение играет важную роль в водных системах, так как с этим параметром тесно связана аэрация: от величины поверхностного натяжения зависит размер пузырьков, который в свою очередь определяет эффективность пузырьковых аэраторов и пеноотделителей.

КОНЦЕНТРАЦИЯ ИОНОВ ВОДОРОДА

Концентрация ионов водорода обычно выражается величиной рН:

$$pH = -\lg [H^+], \quad (2.16)$$

где $[H^+]$ — концентрация ионов водорода.

При рН 7 среда считается нейтральной, при меньших значениях — кислой, при больших — щелочной. От рН зависят константы диссоциации многих химических реакций, происходящих в водных растворах. Таким образом, рН оказывает большое влияние на химическую среду, в которой обитают водные организмы. Например, с увеличением рН равновесие между NH_4^+ и NH_3 в водной среде сдвигается в сторону образования NH_3 . Для большинства видов рыб NH_3 — высокотоксичное вещество. Для одного и того же вида рыб вода с рН 6,5 совершенно безопасна, в то время как при рН 8 она становится высокотоксичной. Если величина рН очень значительно отличается от нейтральной, то вода сама по себе может стать токсичной для большинства гидробионтов. Величина рН определяет также доступность двуокиси углерода для водных организмов.

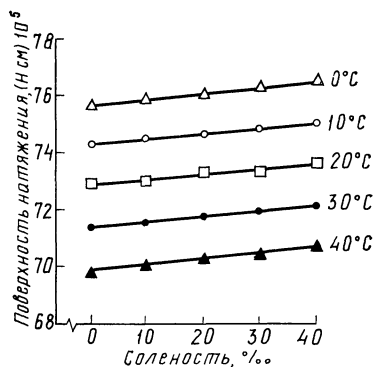


Рис. 2.11. Зависимость поверхностного натяжения воды, контактирующей с воздухом, от солености при различных значениях температуры (Handbook of Chemistry and Physics. 1969)

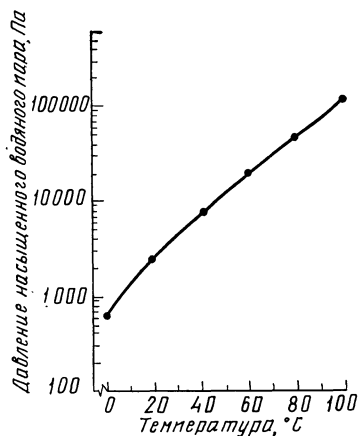


Рис. 2.12. Зависимость давления насыщенного водяного пара от температуры (Handbook of Chemistry and Physics, 1958)

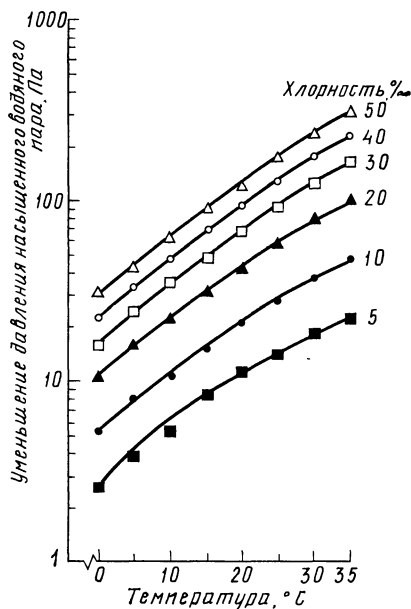


Рис. 2.13. Зависимость уменьшения давления насыщенного водяного пара различной хлорности от температуры (Arons and Kientzler, 1954). Transactions American Geophysical Union 35 (5): 725. Copyrighted by America Geophysical Union.

В водах озер pH изменяется от 6 до 9, но под влиянием вулканических кислот может уменьшиться до 1,7. Если питающие озеро ручьи текут по известковым отложениям, pH может превышать 9 (Reid, 1961). В океанах pH поверхностных вод обычно находится в пределах 7,8—8,3, причем наиболее высокие значения наблюдаются в субтропических водах. Величина pH мало изменяется благодаря большой буферной емкости океанических систем (Sverdrup et. al., 1942).

ДАВЛЕНИЕ НАСЫЩЕННОГО ПАРА

Давление насыщенного пара — это давление, которое оказывает газообразная фаза вещества, находящаяся в равновесии с твердой или жидкой фазой. Давление насыщенного пара чистой воды является функцией температуры (рис. 2.12) и снижается при добавлении в воду солей. Зависимость давления насыщенного пара от хлорности выражается следующим выражением (Brahtz, 1968):

$$VP = (VP)_0 [1 - 0,000969 Cl], \quad (2.17)$$

где VP — давление насыщенного пара соленой воды; $(VP)_0$ — давление насыщенного пара чистой воды при той же температуре; Cl — хлорность, ‰.

Подставляя уравнения (2.1) в уравнение (2.17), можно связать давление насыщенного пара непосредственно с соленостью:

$$VP = (VP)_0 [1,000016 - 0,000537S]. \quad (2.18)$$

Давление насыщенного пара соленой воды можно вычислить по уравнению (2.17) или (2.18). Однако без калькулятора выполнение этих расчетов довольно трудоемко. Процедура вычислений значительно упрощается при использовании графиков, приведенных на рис. 2.12 и 2.13. Прежде всего определяют температуру. Затем, восстановив перпендикуляр из точки на оси абсцисс (см. рис. 2.12), соответствующей данной температуре, до пересечения с линией графика, проводят горизонтальную линию до оси ординат и снимают значение давления насыщенного пара для чистой воды $(VP)_0$. После этого на рис. 2.13 от значения известной температуры проводят вертикальную линию до пересечения с линией графика соответствующей хлорности. Из этой точки проводят горизонтальную линию до пересечения с осью ординат и получают значение уменьшения давления насыщенного пара VP_L для данной пробы. Давление насыщенного пара затем вычисляют по уравнению

$$VP = VP_0 - VP_L. \quad (2.19)$$

Переход от солености к хлорности и обратно, необходимый для пользования графиком на рис. 2.13, может быть выполнен с помощью уравнения (2.1).

ОСМОТИЧЕСКОЕ ДАВЛЕНИЕ

Если разделить полупроницаемой мембраной два водных раствора с различным содержанием соли, то вода под воздействием осмотических сил будет проникать сквозь мембрану из камеры с меньшим содержанием соли в камеру с большим ее содержанием. Если камера с большей концентрацией соли закрыта и она находится под давлением, то оно вызовет движение воды сквозь полупроницаемую мембрану из области высокого давления в область низкого. При этом будет достигнуто такое положение, когда поток воды, вызванный внешним физическим давлением, будет равен потоку в противоположном направлении, вызванному осмотическими силами. Значение приложенного физического давления в этот момент равновесия будет соответствовать значению осмотического давления. Осмотическое давление — это давление, которое необходимо приложить для предотвращения проникновения воды сквозь полупроницаемую мембрану при различных концентрациях соли по разные стороны от мембраны.

Осмотическое давление соленой воды при 0°C может быть вычислено по следующему уравнению (Brahtz, 1968):

$$(OP)_0 = -12,24FPL, \quad (2.20)$$

где $(OP)_0$ — осмотическое давление при 0°C , Па·10⁵; FPL — понижение точки замерзания, $^\circ\text{C}$.

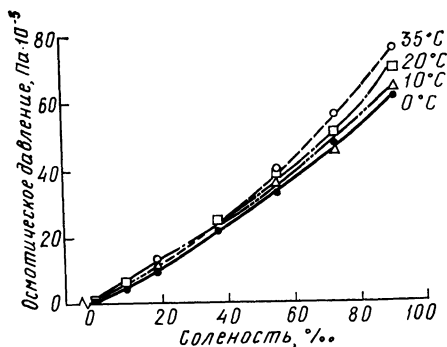
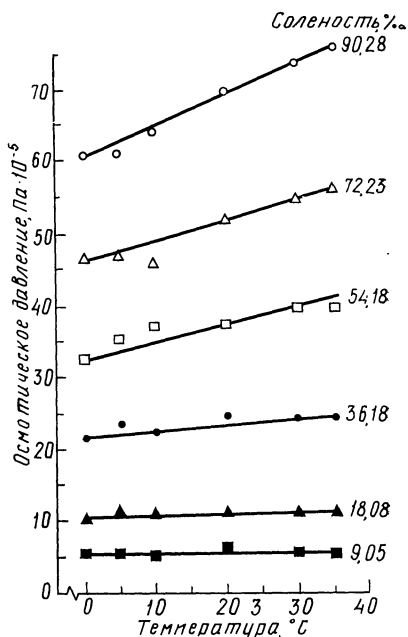


Рис. 2.14. Зависимость осмотического давления от солености при различных температурах воды (Wilson and Arons, 1955)

Рис. 2.15. Зависимость осмотического давления от температуры для вод различной солености (Wilson and Arons, 1955)



При температурах, отличных от 0°C , осмотическое давление можно рассчитать по уравнению (2.21)

$$(OP)_t = (OP)_0 \frac{273 + T}{273}, \quad (2.21)$$

где $(OP)_t$ — осмотическое давление ($\text{Па} \cdot 10^5$) при температуре T ($^{\circ}\text{C}$).

И температура, и соленость влияют на величину осмотического давления. На рис. 2.14 показана зависимость осмотического давления от солености при различных значениях температуры, а на рис. 2.15 — от температуры при различных значениях солености. Наклон линий на рис. 2.14 больше, чем на рис. 2.15, что свидетельствует о большем по сравнению с температурой влиянии солености на осмотическое давление.

Биологические организмы (точнее, их внешняя оболочка) представляют собой полупроницаемые мембраны по отношению к окружающей их водной среде. Содержание солей в организмах отличается от их содержания в водной среде, поэтому гидробионтам приходится затрачивать энергию для поддержания собственного солевого баланса. Эти затраты изменяются при передвижении организмов в водах различной солености. Слишком быстрые или значительные изменения во внешней среде могут потребовать энергии, которую организм не в силах выработать, результатом чего может быть его гибель. Осмотическое давление — основной критерий, по которому организмы разделяются на пресноводные и морские.

ПРОЗРАЧНОСТЬ

Прозрачность воды в естественных водоемах изменяется от значительной до практически равной нулю. Она зависит от типа, размера и количества взвешенных частиц, концентрации и химических свойств растворенных веществ, а также от длины волны, интенсивности и угла падения солнечного света. Прозрачность обычно измеряется либо с помощью диска Секки, либо прибором типа спектрофотометра, который позволяет определять количество света, поглощенного пробами воды.

Диаметр белого или черно-белого диска Секки обычно составляет 30 см. Он прикреплен к тросу, по всей длине которого через каждый метр сделаны отметки (рис. 2.16). Для определения прозрачности диск опускают за борт, постепенно погружая его в толщу воды. В тот момент, когда глаз перестает различать диск, производят отсчет глубины. Для прибрежных вод прозрачность по диску Секки может изменяться от нескольких сантиметров до 25 м. Значения прозрачности для открытого океана обычно составляют 45—60 м. Самая большая глубина, на которой диск Секки становится неразличимым, равна 66 м и зарегистрирована для Саргассова моря (Bowditch, 1966). Для пресноводных озер значения прозрачности по диску Секки составляют от 40 м до близких к нулю (Reid, 1961).

Диск Секки позволяет определить относительную прозрачность, значения которой можно сравнивать для различных водоемов. Количественные измерения производятся при помощи приборов типа спектрофотометров. Простейшая схема измерения поглощения света приведена на рис. 2.17. В нее входят источник света, исследуемая проба воды толщиной d , фотодетектор и вольтметр. Свет от лампы проходит через столб воды, а затем попадает на фотодетектор. Электрический сигнал на выходе фотодетектора пропорционален интенсивности падающего на него света. Погло-

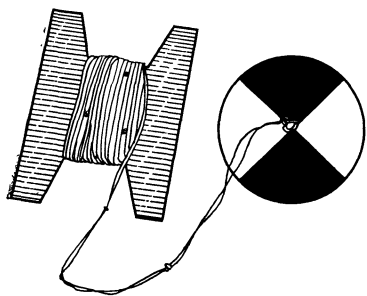


Рис. 2.16. Диск Секки и трос с отметками измерения глубины

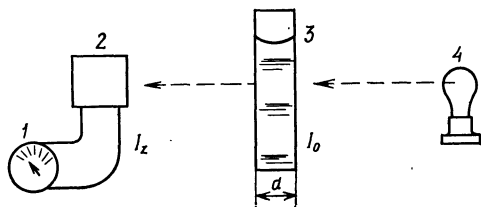


Рис. 2.17. Простое устройство для измерения поглощения света:

1 — вольтметр; 2 — фотодетектор; 3 — проба воды; 4 — источник света

шение света в этом случае математически выражается законом Ламберта:

$$I_z = I_0 e^{-kd}, \quad (2.22)$$

где I_0 — интенсивность света, падающего на пробу воды; I_z — интенсивность света, прошедшего через воду; k — коэффициент поглощения, e — основание натуральных логарифмов; d — толщина пробы воды.

Уравнение (2.22) может быть использовано для определения значения k , но так как k зависит от длины волны падающего света, значение длины волны также должно быть указано. Поскольку I_z измеряется фотодетектором, I_0 , d и e известны, может быть вычислен k . Однако величина k не определяет мутность воды.

Уравнение (2.22) может быть приведено к следующему виду:

$$I_z = I_0 e^{-mdc}, \quad (2.23)$$

где m — коэффициент ослабления; d — толщина пробы воды; c — концентрация взвешенного вещества по сухому весу.

I_z и I_0 определяются так же, как в уравнении (2.22).

Сравнивая уравнения (2.22) и (2.23), получаем

$$k = mc.$$

Преимущество уравнения (2.23) заключается в том, что оно позволяет выделить влияние концентрации взвеси среди прочих параметров. С помощью уравнения (2.23), используя предварительно полученные в лаборатории значения m и измеряя в полевых условиях I_z/I_0 и глубину d , можно определять концентрации растворенных и взвешенных веществ. Однако этот метод имеет один существенный недостаток. Поглощение взвешенных или растворенных в воде веществ зависит от длины волны и интенсивности падающего света, поэтому в пробах, используемых для калибровки приборов, должны содержаться те же примеси, концентрации которых определяются в полевых условиях, и во всех анализируемых пробах должны содержаться примеси одного типа. Если эти условия не соблюдаются, в результате наблюдений необходимо вносить поправки.

ЦВЕТ

Цвет воды — это результат взаимодействия падающего света с содержащимися в ней примесями. Чистая вода, освещенная солнечным светом, кажется синей, поскольку синий свет проникает глубже и больше рассеивается водой. Отражение от облаков изменяет кажущийся цвет воды. Цвет воды меняется в зависимости от физической природы и химического состава присутствующих в ней примесей. Зеленые водоросли окрашивают воду в зеленый цвет. Взаимодействие синего рассеянного света и зеленого цвета водорослей дает сине-зеленую окраску, характерную для вод Карибского моря. Частицы почвы часто придают воде красноватый оттенок.

Поскольку цвет и прозрачность воды зависят от наличия примесей, а также от пропускания и отражения света водной средой, между этими параметрами существует тесная взаимозависимость. Воды с высокой биологической продуктивностью имеют низкую прозрачность, а их цвет определяется цветом преобладающих видов фитопланктона. Воды с низкой биологической продуктивностью обычно синие и очень прозрачные, поскольку их цвет определяется в значительной степени рассеянием света самой водой. Цвет воды в таких высокопродуктивных водоемах, как водоемы прудовых хозяйств, определяется фитопланктоном. Опытные рыбоводы по цвету воды часто определяют ее качество. Например, изменение цвета прудовой воды может указывать на возможность дефицита кислорода. Таким образом, информация о причинах, вызывающих изменение цвета и прозрачности воды, может быть с успехом использована для определения условий разведения водных организмов.

ПОКАЗАТЕЛЬ ПРЕЛОМЛЕНИЯ

Показатель преломления воды зависит от ее температуры и солености. На рис. 2.18 представлена зависимость показателя преломления воды от температуры, а на рис. 2.19 — влияние солености на показатель преломления воды при температуре 25 °С. Эта зависимость описывается уравнением

$$N_{25} = 1,332497 + 0,000334 (C), \quad (2.24)$$

где N_{25} — показатель преломления воды при 25 °С.

Показатель преломления определяет изменение направления света и, следовательно, косвенно влияет на цвет воды. Выше уже отмечалось значение цвета воды для установления условий жизнедеятельности биологических организмов. С помощью рефрактометра высокой точности и уравнений (2.24) и (2.1) можно расчи-

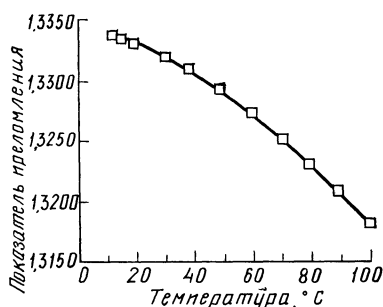


Рис. 2.18. Зависимость показателя преломления воды от температуры (Data from Handbook of Chemistry and Physics, 1958)

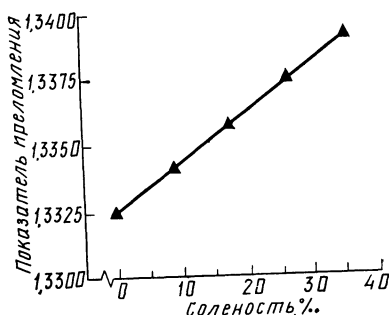


Рис. 2.19. Показатель преломления соленой воды при температуре 25 °С для различных значений солености (Data from Mujake, 1939)

тать соленость. Однако, поскольку оборудование для определения электропроводности в настоящее время дешевле, на практике обычно предпочитают этот метод определения солености.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В главе 2 рассматривались свойства пресной и соленой воды и их влияние на условия разведения и выращивания водных организмов. Эти свойства сведены в табл. 2.2.

Таблица 2.2. Свойства пресной и соленой воды

Свойство	Направление изменения при увеличении		
	солености	температуры	давления
Удельная теплопроводность	Уменьшается	Возрастает	Возрастает
Удельная теплоемкость	Уменьшается	Возрастает	Уменьшается
Скрытая теплота парообразования	Не изменяется	Уменьшается	Не изменяется
Давление пара	Уменьшается	Возрастает	Не изменяется
Температура замерзания	Уменьшается	—	Не изменяется
Температура кипения	Возрастает	—	Возрастает
Осмотическое давление	Возрастает	Возрастает	Не изменяется
Температура при максимальной плотности	Уменьшается	—	—
Вязкость	Возрастает	Уменьшается	Не изменяется
Коэффициент поверхностного натяжения	Возрастает	Уменьшается	Не изменяется
Показатель преломления	Возрастает	Уменьшается	Возрастает
Плотность	Возрастает	Уменьшается	Возрастает
Поглощение света	Не влияет	Не влияет	Не влияет

REFERENCES

- Arons, A. B. and C. F. Kientjler (1954). Vapor Pressure of Seasalt Solutions. Transactions of the American Geophysical Union 35 (5): 722—728.
- Bowditch (1966). Oceanography, Part 6 of American Practical Navigator, H. O. Publication No. 9—Part 6, U. S. Navy Hydrographic Office.
- Brahzt, J. T. (1968). Ocean Engineering. Wiley, New York.
- Handbook of Chemistry and Physics, C. D. Hodgman, Ed. (1958). Chemical Rubber Publishing Company, Cleveland.
- Handbook of Chemistry and Physics, 50th ed., R. C. Weast, Ed. (1969). Chemical Rubber Publishing Company, Cleveland.
- Handbook of Tables for Applied Engineering Science, R. E. Bolz and G. L. Tuve, Eds. (1970). Chemical Rubber Company, Cleveland.
- Hobaica, E. D. (1964). Buoyancy Systems for Deep Submergence Structures. Naval Engineers Journal 75 (5): 733—741.
- International Critical Tables of Numerical Data, Vol. 3 (1928). McGraw—Hill, New York.
- International Critical Tables of Numerical Data, Vol. 4 (1928). McGraw—Hill, New York.
- International Critical Tables of Numerical Data, Vol. 5 (1929). McGraw—Hill, New York.
- International Oceanographic Tables (1966). National Institute of Oceanography of Great Britain and UNESCO, London.

- King D. A. (1969). Basic Hydrodynamics, Section 2 in Handbook of Ocean and Underwater Engineering, J. J. Myers, Ed. McGraw—Hill, New York.
- Mechanical Engineers' Handbook. L. S. Marks, Ed. (1941). Mc Graw—Hill, New York.
- Mujake, Yasso (1939). Chemical Studies of the Western Pacific Ocean. IV. The Refractive Index of Seawater. Bulletin of the Chemical Society of Japan 14 (6): 239—242.
- Rawson, K. J. and E. C. Tupper (1968). Basic Ship Theory. American Elsevier, New York.
- Reid, George K. (1961). Ecology of Inland Waters and Estuaries. Reinhold, New York.
- Semioli, W. J. and P. B. Schubert (1974). Conversion Tables for SI Metrifification. Industrial Press, New York.
- Sverdrup, H. U., Martin W. Johnson, and Richard H. Fleming (1942). The Oceans—Their Physics, Chemistry and General Biology. Prentice—Hall, Englewood Cliffs, N. J.
- Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 13th ed. (1971). American Public Health Association, Washington, D. C.
- Tsurikova, A. P. and V. L. Tsurikov (1971). On the Concept of «Salinity». Oceanology 11 (2): 282—285.
- Wilson, K. G. and A. B. Arons (1955). Osmotic Pressures of Seawater Solutions Computed from Experimental Vapor Pressure Lowering. Journal of Marine Science 14(2): 195—198.

Глава 3. ЭНЕРГИЯ В ВОДНЫХ СИСТЕМАХ

Процессы, протекающие на Земле, поглощают солнечную, геотермальную и атомную энергию. Последние два вида энергии вносят пренебрежимо малый вклад в суммарную энергию, поэтому можно считать, что именно энергия Солнца определяет погоду на Земле, океаническую циркуляцию, нагревание нашей планеты, обеспечивает протекание фотосинтеза и других процессов. В этой главе рассмотрены распределение и перенос энергии и влияние этих процессов на обитающие в водной среде организмы.

ЭНЕРГИЯ ИЗЛУЧЕНИЯ

Спектральное распределение солнечной энергии выше слоя атмосферы и на уровне земной поверхности представлено на рис. 3.1. Это распределение является, разумеется, усредненным, поскольку величина излучения, достигающего поверхности Земли в данное время в конкретной точке, зависит от географического положения этой точки, плотности облачного покрова, содержания пыли в атмосфере и многих других факторов. Однако данные, усредненные по большим площадям, могут оказаться также очень полезными.

Величина энергии излучения, падающего на плоскую поверхность, помещенную выше слоя атмосферы перпендикулярно направлению падения луча, E_s составляет около 1395 Вт/м². Обычно эту величину называют солнечной постоянной. Однако наблюдаемая с Солнца поверхность Земли представляет собой не сферу, а круг. При учете площади поверхности шара среднесуточная вели-

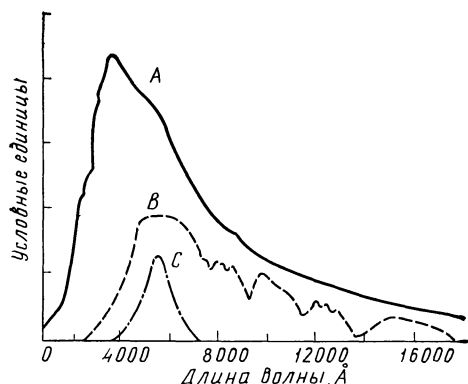


Рис. 3.1. Спектральное распределение солнечного излучения выше слоя атмосферы (A) и у поверхности Земли (B); кривая C соответствует спектральной чувствительности человеческого глаза (Hutchinson, 1957)

чина энергии, падающей на единицу площади земной поверхности, равна 349 Вт/м^2 . Из рис. 3.1 видно, что энергия солнечного излучения распределена по спектру неравномерно. На долю рентгеновского и микроволнового излучения, соответствующих краям спектра, приходится около 0,001 % суммарной энергии (Flohn, 1966). Основная доля энергии приходится на излучение с длиной волны в диапазоне 200—3000 нм. Максимум интенсивности достигается при длине волны 450 нм.

Существование энергетического равновесия предполагает, что для больших периодов времени суммарная получаемая системой энергия равна отдаваемой. В противном случае имело бы место долговременное накопление энергии или непрерывная ее потеря. Хотя запасенная чистая энергия может принимать различные формы, при накоплении энергии почти наверняка происходило бы медленное повышение средней температуры; соответственно свидетельством потери чистой энергии было бы постепенное понижение средней температуры.

Поступающая солнечная энергия E_s частично поглощается и частично отражается. Около 16 % E_s поглощается атмосферой в основном водяными парами, двуокисью углерода, озоном и молекулярным кислородом. Водяной пар поглощает значительное количество энергии в инфракрасной области спектра, особенно в диапазоне 800—7000 нм; озон — в ультрафиолетовой области. Облака, закрывающие в среднем в любое время около 52 % площади поверхности Земли, отражают около 2 % E_s . Около 7 % E_s снова излучается в атмосферу в результате обратного рассеяния частицами пыли, мелкими каплями воды, молекулами атмосферных газов и другими присутствующими в атмосфере рассеивателями.

Около 4 % падающей на поверхность Земли солнечной энергии отражается. Таким образом, только 47 % энергии, попадающей в верхние слои атмосферы, поглощается земной поверхностью (табл. 3.1) (Flohn, 1966).

Другим важным составным элементом энергетического баланса является длинноволновое излучение, особенно излучение в диапазоне 4000—1 000 000 нм. Излучение самой Земли происходит по закону Стефана—Больцмана:

Т а б л и ц а 3.1. Распределение энергии излучения, падающей на Землю

Падающая радиация	Количество энергии, Вт/м ²
E_S —величина солнечной энергии выше слоя атмосферы, усредненная по сферической поверхности	349,0
16% E_S поглощается атмосферой	55,8
24% E_S отражается облаками	83,8
2% E_S поглощается облаками	7,0
7% E_S обратно рассеивается на частицах и молекулах	24,4
51% E_S достигает поверхности Земли	178,0
4% E_S отражается от поверхности Земли	14,0
47% E_S поглощается поверхностью Земли	164,0
Длинноволновое излучение	
E_R —энергия теплового излучения земной поверхности	399,0
E_{RR} —энергия излучения земной поверхности, поглощенного атмосферой и вновь излученного в направлении Земли	337,0
E_{LS} —результатирующая потеря энергии из-за излучения земной поверхности	62,0

$$E_R = \sigma_A T_A^4,$$

где E_R — энергия, излучаемая поверхностью Земли, σ_A — постоянная Стефана—Больцмана; T_A — средняя абсолютная температура поверхности Земли.

Энергия земного излучения E_R , усредненная по северному полушарию, составляет около 399 Вт/м² (Flohn, 1966). Эта величина значительно превышает величину падающего излучения и с точки зрения энергетического баланса весьма существенно, что значительная часть длинноволнового излучения Земли поглощается атмосферой. Водяные пары и двуокись углерода поглощают длинноволновое излучение во всем спектральном диапазоне, за исключением нескольких «атмосферных окон» между 8000 и 12000 нм. Энергия, излучаемая через эти «окна», составляет около 18,89 Вт/м². Большая часть поглощаемой энергии снова излучается в направлении Земли (около 337 Вт/м²) (Flohn, 1966). Таким образом, теряемая Землей энергия равна излучаемой энергии E_R за вычетом поглощенной и вновь излученной в направлении Земли энергии E_{RR} .

Чистая свободная энергия излучения у поверхности Земли

$$E_N = E_S - E_L - (E_R - E_{RR}), \quad (3.1)$$

где E_N — чистая свободная энергия; E_S — энергия солнечного излучения над слоем атмосферы; E_L — потери солнечной энергии в результате атмосферного

поглощения и отражения; E_R — энергия теплового излучения земной поверхности; E_{RR} — энергия поглощенного атмосферой излучения земной поверхности и вновь излученного в направлении Земли.

Подставляя в уравнение (3.1) значения из табл. 3.1, получаем

$$E_N = E_S - 0,53E_S(339 - 337);$$

$$E_N = 349 - 185 - 62;$$

$$E_N = 102 \text{ Вт/м}^2.$$

Таким образом, поверхность Земли получает энергию, равную 102 Вт/м^2 , которую надо учитывать при составлении уравнения теплового баланса:

$$E_N = E_{\text{тепл}} - E_{\text{исп}} + E_{\text{биол}} + E_{SS}, \quad (3.2)$$

где E_N — чистая свободная энергия; $E_{\text{тепл}}$ — энергия, затрачиваемая на нагревание воздуха в результате конвективной теплопередачи от поверхности Земли; $E_{\text{исп}}$ — энергия, затраченная на испарение воды; $E_{\text{биол}}$ — энергия, используемая в таких биологических процессах, как фотосинтез, дыхание и гниение; E_{SS} — энергия, поглощенная сушей и водой.

Температура атмосферы уменьшается на величину от 0 до 10°C при увеличении высоты на 1 км, поэтому обычно происходит перенос тепла от поверхности земли вверх. Очевидно, что это справедливо не для любой точки земного шара и не для любых периодов времени, а только при усреднении данных за весь год для всей поверхности земли. Конвективная передача тепла от земли воздуху зависит от интенсивности вертикального атмосферного перемешивания, температуры поверхности земли, приповерхностных ветров и многих других факторов. Для северного полушария этот перенос составляет около $36,7 \text{ Вт/м}^2$ (Flohn, 1966).

Факторы, влияющие на испарение с поверхности земли, аналогичны обуславливающим конвективную передачу тепла. Однако горизонтальные разности температур, определяющие горизонтальное перемещение воздушных масс, играют более важную роль в процессе поглощения тепла при испарении, чем вертикальная конвективная передача тепла. На испарение затрачивается около 65 Вт/м^2 (Flohn, 1966). Это составляет около 64 % чистой свободной энергии E_N и соответствует скорости испарения воды 82 см в год для всей земной поверхности. По данным Мёллера (Möller, 1957), среднегодовое количество осадков на земном шаре составляет 83 см, причем для северного полушария эта величина равна 82 см. Таким образом, можно считать, что солнечная энергия затрачивается в основном на осуществление гидрологического цикла. Испарение и конвективная передача тепла поглощают $101,7 \text{ Вт/м}^2$, или 99,7 % чистой свободной энергии E_N . По сравнению с $E_{\text{тепл}}$ и $E_{\text{исп}}$ величины $E_{\text{биол}}$ и E_{SS} пренебрежимо малы, в особенности при усреднении для длительных периодов времени (за несколько лет) и для больших площадей. Перенос тепла в глубь почвы происходит на глубину 30—50 см при суточных и до 5 м при сезонных колебаниях температуры. Огромное количество тепла поглощает таяние снега или льда.

Передача тепла для свободных водных поверхностей (океаны, озера, реки) невелика при усреднении за длительные периоды времени по большим площадям. Однако это не так для ограниченных площадей и коротких отрезков времени. Теплопередача в движущейся воде ускоряется благодаря возникновению конвекции. Конвективная передача тепла в океанах обычно в 10^3 — 10^4 раз больше, чем кондуктивная теплопередача, характерная для континентальных областей, поэтому приморский климат характеризуется большей стабильностью температур. Когда холодный воздух соприкасается с относительно теплой водой, происходит быстрая передача тепла, например когда зимние арктические воздушные массы проходят над океаническими водами, движущимися из тропических областей. Одна из зон, где теплообмен может достигать 480 Вт/м^2 (Flohn, 1966), расположена к северо-востоку от США.

Биологические процессы по сравнению с испарением и конвективными потерями поглощают небольшое количество энергии (менее 1 % E_N). Однако это количество энергии поддерживает существование всего живого на Земле. Используемые в настоящее время источники энергии (нефть, газ, уголь) образовались как следствие накопления энергии в результате фотосинтеза.

В глобальном тепловом балансе также существуют системы накопления. Биологические системы накапливают энергию в нефти, газе и угле. Водяной пар и скрытая теплота могут некоторое время (до 11 дней) накапливаться в атмосфере. Океан также является огромным хранилищем энергии. Поскольку время оборота воды в океане может достигать 5000 лет, периоды до проявления последствий протекающих здесь процессов могут быть весьма длительными. Энергия может также накапливаться и высвобождаться в ледовых арктических и антарктических массивах. Период существования льда составляет 10^4 — 10^5 лет (Flohn, 1966).

Общий тепловой баланс и процессы теплопередачи определяют условия среды. Однако для сельского и рыбного хозяйства гораздо важнее местные и региональные энергетические уровни и энергетический обмен. На рис. 3.2 показана зависимость чистой энергии от температуры для северного полушария. Из рисунка также видно, как изменяется величина энергии излучения в зависимости от сезона. Изменения величины поступающей энергии излучения приводят к изменениям температуры, плотности, а иногда и солености воды. Эти изменения в свою очередь вызывают движения водных масс, имеющие большое значение для жизни в водной среде.

На фотосинтез затрачивается менее 1 % свободной энергии, достигающей поверхности Земли. По оценке Исаакса (Isaacs, 1969), из каждого миллиона падающих на Землю фотонов только 90 дают энергию, необходимую для основного процесса, обуславливающего производство продуктов питания. По его оценке, 50 фотонов затрачиваются на рост растений на суше, а 40 — на рост фитопланктона в водной среде. На этом основании можно считать,

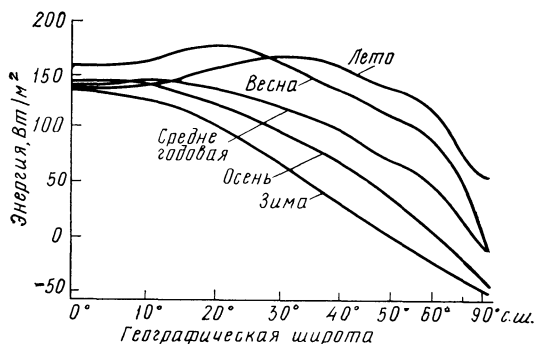


Рис. 3.2. Энергия солнечного излучения над атмосферой в северном полушарии для различных сезонов и усредненная за год (Flohn, 1966)

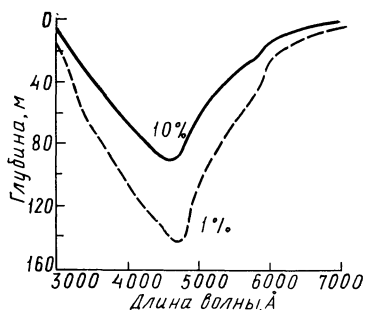


Рис. 3.3. Зависимость глубины проникновения света в чистую морскую воду от его длины волны (Jerlov, 1951)

что фотосинтез поглощает около 0,009 % падающей энергии. Хотя поверхность Земли на 71 % покрыта водой, менее половины энергии, затрачиваемой на фотосинтез, поглощается водными растениями.

Более низкая продуктивность водной среды обусловлена несколькими причинами. Водные пространства, как правило, не подвергаются какой-либо обработке, в то время как территории суши в основном культивируются. Культивированные площади полнее используют падающую энергию. Кроме того, вода поглощает свет значительно сильнее, чем воздух, поэтому растения, находящиеся даже на незначительной глубине, не получают того количества света, которое падает на поверхность воды. На рис. 3.3 показано, на какую глубину проникает свет в чистой океанической воде. Однопроцентная кривая на этом рисунке определяет фотическую зону — глубину, на которой интенсивность проникающего света составляет 1 % интенсивности света, падающего на поверхность воды. Глубже всего проникает голубой свет с длинами волн 450—500 нм. Именно по этой причине вода чаще всего имеет тот или иной оттенок голубого цвета. Возможно, основным фактором, ограничивающим продуктивность водной среды, является отсутствие питательных веществ. На огромных пространствах океанов количество питательных веществ недостаточно для использования растущими растениями всего падающего излучения.

Вместе с тем продуктивность всех растений лимитируется их способностью поглощать и использовать энергию только определенных длин волн. Все растения как на суше, так и в водной среде поглощают свет с помощью нескольких пигментов. Каждый вид растений имеет определенный набор пигментов и может использовать только ту энергию, которую поглощают эти пигменты. В целом растения поглощают свет в видимой части спектра с длиной волны от 400 до 800 нм. На рис. 3.4 приведены спектры пог-

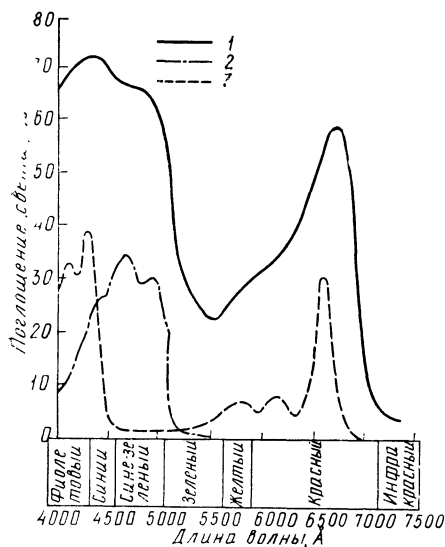


Рис. 3.4. Поглощение света тканью листа и различными фотосинтетическими пигментами (данные д-ра М. Хоммерсанда, университет Северной Каролины):

1 — зеленый лист; 2 — β-каротин; 3 — хлорофилл а

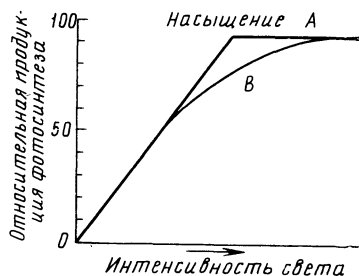


Рис. 3.5. Кривая светового насыщения растений

поглощения экстрагированного хлорофилла а, β-каротина и неповрежденного листа. Хлорофилл а интенсивно поглощает свет с длиной волны 425 и 650 нм; β-каротин имеет интенсивную область поглощения в диапазоне длин волн от 450 до 500 нм. Другие пигменты интенсивно поглощают свет при различных длинах волн. Поглощение листа определяется суммой поглощения всех имеющихся в нем пигментов. Полное поглощение зависит от содержания пигментов в листе и типа пигментов. На общую поглощающую способность растения влияет его возраст, состояние и адаптация к определенному уровню освещения.

К факторам, лимитирующим продукцию фотосинтеза, относится и так называемое световое насыщение. Любое растение обладает «центрами» поглощения света. Световая энергия, поглощаемая растениями, должна в какой-то точке цепи передачи энергии пройти через хлорофилл а. Поскольку любое растение содержит лишь ограниченное количество хлорофилла а, оно может использовать только такое количество энергии, которое необходимо для поддержания непрерывной активности молекул хлорофилла а. Энергия излучения, превышающая уровень насыщения, не может быть использована растением. Для некоторых растений лимитирующим фактором может быть не содержание хлорофилла а, а, например, недостаток поглощающих пигментов. На рис. 3.5 упрощенно показан процесс светового насыщения. При низких уровнях освещенности скорость фотосинтеза растет с увеличением освещенности. По достижении некоторого значения интенсивности света, называемого уровнем насыщения, продукция фотосинтеза уже не возрастает при дальнейшем увеличении интенсивности света. На рисунке показано (кривая А) резкое изменение накло-

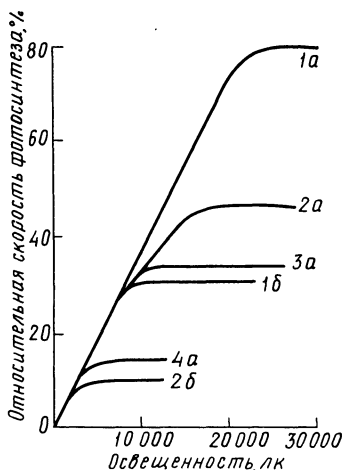


Рис. 3.6. Световое насыщение для различных видов водорослей:

1 — тропический планктон; 2 — летний планктон умеренных широт; 3 — летний арктический планктон; 4 — зимний планктон умеренных широт; а — планктон на поверхности, б — планктон у нижней границы фотической зоны (Steeman Nielsen and Hansen, 1959)

на кривой в точке насыщения. Для реальных растений этот переход происходит более плавно (кривая В).

Различные растения имеют разный уровень светового насыщения. На уровень насыщения влияет генетическое строение, состояние растения, относительный возраст, приспособленность к определенному уровню интенсивности света. Не исключено, что уровень насыщения растения, ранее приспособленного к низкой освещенности и помещенного на достаточно длительный срок в условия с более высокой освещенностью, может повыситься. Однако это справедливо не для всех растений, поскольку избыточный свет может замедлять фотосинтез. Взрослое растение может эффективнее использовать свет, чем то же растение на более ранней или более поздней стадии развития.

Явление светового насыщения для некоторых видов фитопланктона показано на рис. 3.6. Заметим однако, что виды живущие вблизи поверх-

ности или в тропиках, т. е. в областях с повышенной интенсивностью света, имеют более высокий уровень светового насыщения.

С инженерной точки зрения интересна производительность системы на единицу потребляемой энергии. Растения, способные фотосинтезировать, производят органическое вещество из неорганических материалов под действием световой энергии. Часть органических веществ разрушается в процессе дыхания, необходимого для жизнедеятельности растений. Процесс дыхания протекает как в темноте, так и на свету. На рис. 3.7 показано влияние этих процессов на гипотетическое растение при усреднении по некоторому периоду времени. При этом сделано допущение, что потери на дыхание не зависят от падающего излучения. Такое допущение вполне обосновано, поскольку все параметры среды, кроме интенсивности падающего света, остаются постоянными. На рис. 3.7 рассматривается случай, когда световое насыщение не достигается. Влево от точки А находится область, где растение использует собственные пищевые резервы для обеспечения своей жизнедеятельности. В этой области растение в конце концов погибнет, поскольку оно тратит больше питательных веществ, чем вырабатывает. В точке А продукция равна затратам на дыхание, такое растение не будет ни расти, ни размножаться, т. е. потери на дыхание составляют 100 %. Справа от точки А продукция фо-

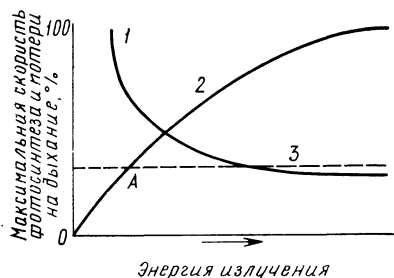


Рис. 3.7. Потребление энергии растениями (Ryther, 1959; Science, vol. 30, p. 602—608):

1 — потери на дыхание, %; 2 — скорость фотосинтеза; 3 — интенсивность дыхания

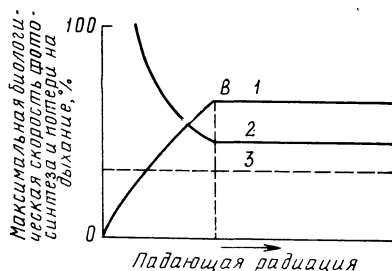


Рис. 3.8. Влияние светового насыщения на продукцию фотосинтеза:

1 — скорость фотосинтеза; 2 — потери на дыхание, %; 3 — интенсивность дыхания.

тосинтеза превышает потребности на дыхание. Растение получает достаточно энергии для роста и размножения. По мере увеличения интенсивности падающего света возрастает и продукция фотосинтеза; потери на дыхание уменьшаются, поскольку они постоянны, т. е. не зависят от падающего излучения. С биологической точки зрения максимум продукции совпадает с максимумом интенсивности падающего света, поскольку здесь минимальны потери на дыхание.

Снимая ограничение, принятое для рис. 3.7, получим схему, приведенную на рис. 3.8. Здесь световое насыщение достигается в точке В. Слева от точки В картина аналогична представленной на рис. 3.7. Справа от точки В продукция фотосинтеза с возрастанием величины падающей энергии остается постоянной, так же как и потери на дыхание. С биологической точки зрения справа от точки В продуктивность растения одинакова для любой интенсивности света. Если растение получает энергию от солнца, которое является природным источником излучения, с экономической точки зрения безразлично, в какой области справа от точки В функционирует система. Однако, если энергия не бесплатная, например при использовании в качестве источников излучения люминесцентных ламп, важно, чтобы система работала в точке В или ниже. Максимальная биологическая эффективность достигается в точке В. Однако в зависимости от соотношения стоимостей электроэнергии и продукции, производимой на каждую дополнительную единицу интенсивности света, для достижения минимальной стоимости продукции, возможно, целесообразно, чтобы система функционировала в точке, расположенной несколько ниже точки максимальной биологической эффективности. Для снижения затрат на производство продукции необходимо иметь кривые биологической эффективности, а также данные о стоимости электроэнергии и цене производимой продукции. В реальных ситуациях необходимо учитывать стоимость рабочей силы, требуемые капиталовложения и другие затраты, но в данном примере эти расходы не учитывались.

В системах, где основным источником энергии является солнечное излучение, например озера, пруды, реки, эстуарии и океаны, следует стремиться к максимальной биологической продуктивности, если это не противоречит другим поставленным задачам, например организации зон отдыха. При создании систем, в которых используются искусственные источники энергии, необходимо определять соотношение затрат и прибыли для всех компонентов системы в целях установления наиболее эффективных уровней используемой энергии излучения.

ТЕРМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

По сравнению с другими параметрами температура воды, по-видимому, оказывает наибольшее влияние на существование живых организмов в водных системах. Температура воды влияет на ее плотность, а поскольку образование градиентов плотности является основной причиной возникновения циркуляций в природных системах, можно считать, что температура оказывает как прямое, так и косвенное влияние на водную среду. Следствием высокой теплоемкости воды является отсутствие в ней резких перепадов температуры, поэтому термические условия среды в водных системах более стабильны, чем в системах, существующих на суше.

Термические условия водной среды определяются полученной энергией излучения. Сезонные или широтные изменения количества попадающей на Землю энергии являются основной движущей силой круговорота воды озер, океанической циркуляции и других перемещений воды. Однако термические характеристики пресной и соленой воды различны, поэтому правильнее рассматривать отдельно пресноводные и солоноводные системы.

ПРЕСНОВОДНЫЕ СИСТЕМЫ

Температура и циркуляция в водоеме определяются характерными для него энергетическими соотношениями. При температуре 4°C плотность воды максимальная, и это в значительной

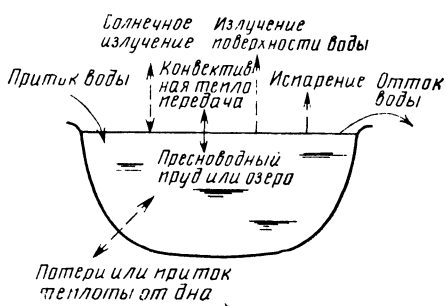


Рис. 3.9. Потоки энергии в пресноводных водоемах

степени обуславливает циркуляцию пресноводных систем. На рис. 3.9 схематически представлены энергетические соотношения для пресного озера или пруда. Солнечное излучение — это всегда поступающая в систему энергия. Величина ее зависит от времени суток, сезона, облачности, географической широты, высоты над уровнем моря, площади поверхности водое-

ма. Испарение и направленное вверх излучение воды приводят к энергетическим потерям, зависящим от сезона, температуры воды и воздуха, скорости ветра, относительной влажности воздуха, площади поверхности пруда или озера, высоты его над уровнем моря, географической широты и времени суток. Направление теплового потока, возникающего в результате разности теплосодержания воды и воздуха, определяется соотношением их температур. В результате энергетического обмена со слоем придонного ила может происходить либо отвод, либо подвод энергии в зависимости от значений средней температуры воды в озере. Если озеро или пруд настолько глубоки, что в них существует термоклин, придонный водный слой обычно получает небольшие количества энергии от дна. Летом в мелководных прудах поток тепла может быть направлен от воды к почве. Вода, втекающая в систему, всегда вносит в нее энергию, поскольку температура воды постоянно выше абсолютного нуля. При вытекании воды из системы происходит отвод энергии. Результирующее влияние втока и вытока воды на среднюю температуру водоема определяется соотношением объемов потоков и их температур. Положение точки стока также оказывает существенное влияние на энергетический баланс, поскольку сток из верхних слоев приводит к отводу более теплой воды (по крайней мере, в течение большей части года), чем сток придонной воды.

Средняя температура воды озера или пруда определяется алгебраической суммой энергетических потоков. Циркуляция возникает из-за стремления системы к стабильному распределению энергии, т. е. относительно постоянному горизонтальному и вертикальному распределению температур, при котором воды с большей плотностью находятся ниже, чем менее плотные воды. Однако величина поступающей и теряемой энергии непрерывно изменяется. Особенно непостоянны величина излучения Солнца и скорость испарения, которые играют наиболее важную роль в энергетическом балансе, поэтому в водных системах всегда существует некоторая циркуляция.

Чтобы лучше представить себе циркуляцию в пресноводных системах, рассмотрим детально изменения, происходящие в озере или пруду в течение годового температурного цикла. Поскольку существует несколько типов годовой циркуляции для различных озер и прудов (см. ниже), рассмотрим сначала димиктическое озеро. Для озера такого типа характерны два круговорота воды в год, обычная стратификация летом и возможность обратной стратификации зимой. Такой тип стратификации характерен для озер умеренных климатических зон. В конце зимы, когда вода покрыта льдом, температура воды непосредственно подо льдом равна 0°C . Глубже подо льдом температура быстро повышается до $1\text{--}2^{\circ}\text{C}$ и остается относительно постоянной с увеличением глубины, незначительно повышаясь вблизи дна. Эта относительная однородность распределения температур является результатом пе-

ремешивания во всем объеме озера. Такое перемешивание происходит осенью до формирования льда.

Весной после таяния льда температура поверхностного слоя повышается до 4°C . Плотность поверхностных вод увеличивается, и они опускаются на дно. Процессу перемешивания способствует также ветер. В этот период весеннего круговорота вод происходит перемешивание всего объема озера до самого дна, обуславливающее установление однородного вертикального распределения температур.

С увеличением продолжительности дня температура поверхностного слоя повышается, а плотность вод в нем уменьшается. Скорость приводного ветра в летние месяцы снижается и соответственно уменьшается ветровое перемешивание. Менее плотная вода остается на поверхности. Поскольку ветровое перемешивание определяет циркуляцию воды только в поверхностном слое толщиной в несколько метров, в озерах такого типа отчетливо выделяются три зоны. Неглубокий поверхностный слой, или эпилимнион, имеет относительно высокую температуру. Вторая зона, так называемый термоклин, или металимнион, характеризуется быстрым снижением температуры с увеличением глубины. Эта зона разделяет теплый поверхностный слой и холодные глубинные воды озера. Уменьшение температуры воды с глубиной сопровождается увеличением ее плотности. Большая плотность нижних слоев определяет стабильность водного столба и препятствует ветровому перемешиванию. Толщина слоя термоклина может составлять от десятых долей метра до 15 м. В начале лета толщина термоклина больше, чем в конце лета, т. е. к концу лета температурные градиенты значительно возрастают. Третий слой — гипolimнион расположен между слоем термоклина и дном озера; здесь с увеличением глубины температура медленно возрастает.

С наступлением осени дни становятся короче и тепловые потери на направленное вверх излучение с поверхности и испарение уже превышают приток тепла в результате солнечного излучения. Охлаждение озера начинается с поверхности. Медленное охлаждение поверхности приводит к увеличению плотности воды в поверхностном слое. Увеличение плотности вызывает усиление циркуляции в эпилимнионе, чему также способствует характерное для осени увеличение скорости ветра. При дальнейшем охлаждении уменьшается сопротивление возникновению циркуляции, связанное с уменьшением температурного градиента термоклина. При нарушении термоклина процесс циркуляции, происходящий в поверхностном слое воды, захватывает все более глубокие слои воды до тех пор, пока в него не включится вся водная масса озера или пруда. Этот процесс называется осенним перемешиванием или круговоротом воды и приводит к более или менее однородному распределению температур по всей глубине озера.

Зимой под слоем льда может наблюдаться обратное распределение температур. Непосредственно под слоем льда температура быстро повышается до 4°C или другой температуры, характер-

ной для данного водоема. Таким образом, более холодная и наименее плотная в данном случае вода находится наверху, причем температура повышается с увеличением глубины пока не достигнет 4°C. Однако подобная обратная стратификация возникает далеко не всегда и существует недолго.

Процесс нагревания и температурных изменений воды под льдом интенсивно изучался. Основными источниками тепла являются проникающее сквозь лед солнечное излучение и тепловое излучение, идущее от дна озера. Перенос тепла в воде под льдом происходит либо в результате плотностных течений, возникающих при проникновении солнечных лучей через лед, либо при существовании градиентов плотностей, вызванных химическими силами, обусловленными переходом вещества из донных отложений в воду.

Тепловые характеристики озер значительно различаются. Однако по некоторым характеристикам может быть проведена классификация. Одну из таких классификаций разработал Рейд (Reid, 1961) для озер, достаточно глубоких для осуществления в них стратификации, перемешивания и образования гипolimниона. В классификации учитывается также высота над уровнем моря, географическая широта, глубина водоема.

Амиктические озера — озера, изолированные от внешней среды постоянным ледовым покровом. К ним относятся слабо изученные озера Антарктиды и высокогорные озера.

Холодные мономиктические озера — озера полярных районов с постоянной температурой воды 4°C или ниже, покрытые льдом, для зимы характерно обратное распределение температур. Перемешивание происходит только летом; при этом температура не превышает 4°C.

Димиктические озера характеризуются наличием весеннего и осеннего круговорота; летом наблюдается обычная температурная стратификация, зимой — температурная инверсия; такие озера характерны для умеренных климатических зон и высокогорных областей субтропиков.

Теплые мономиктические озера — озера с температурой воды, постоянно превышающей 4°C, циркуляция происходит редко и нерегулярно; такие озера типичны для тропических областей и обычно расположены на небольшой высоте над уровнем моря.

Полимиктические озера характеризуются непрерывной циркуляцией при температурах, несколько превышающих 4°C. Такие озера типичны для высокогорных районов тропических областей; стратификация отсутствует, поскольку тепло передается окружающей среде с относительно постоянной температурой.

Озера, в которых циркуляция охватывает всю водную массу до самого дна, называются голомиктическими. В голомиктических озерах температура гипolimниона обычно равномерно снижается с увеличением глубины. Однако в некоторых озерах циркуляция не распространяется на всю глубину озера, даже если верхние слои холоднее нижних. В этих озерах придонный, не охваченный процессом циркуляции слой, так называемый монимолимнион, содер-

жит значительное количество солей, образующихся в результате растворения донных осадков. Растворенные соли настолько увеличивают плотность воды, что более теплая соленая вода становится плотнее более холодной пресной воды над ней. Градиент плотности в мониолимнионе называется хемоклин, поскольку основной причиной увеличения плотности является повышение содержания солей в воде. В слое воды над хемоклином, называемом миксолимнионом, возможно распределение температур, аналогичное распределению в голомиктических озерах.

Рыбоводные пруды редко бывают достаточно глубокими для существования мощного термоклина в течение длительных периодов, поэтому циркуляция в них определяется перемешиванием, вызванным сезонными температурными изменениями и приповерхностными ветрами. При строительстве таких прудов предусматривается возможность хотя бы частичного регулирования циркуляции в соответствии с рыбоводными требованиями.

Циркуляция и тепловые характеристики систем с проточной водой (каналы для выращивания и ручьи) определяются в основном не градиентами плотностей, а гравитационными силами. Однако циркуляция плесов может быть аналогична циркуляции в прудах. Уровень воды постоянно стремится понизиться, что приводит к возникновению турбулентности, нарушающей стратификацию. При проектировании рыбоводных каналов колебания температуры обычно стремятся свести до минимума.

Температура системы с проточной водой в значительной степени определяется различными параметрами, действующими на нее выше по течению. Температура воды в системе определяется температурой источника, зависит от мутности воды, облачного покрова, времени суток, сезона, географической широты, объема и геометрии русла. Системы, питаемые подземными источниками, имеют, по крайней мере вблизи источника, круглый год относительно стабильную температуру. Температура системы, источником которой служит поверхностный сток, в значительной степени зависит от температуры воздуха и почвы. Вдоль русла реки температура воды изменяется главным образом под влиянием поглощения энергии излучения и потери тепла на испарение: если преобладает поглощение энергии, температура воды повышается; высокая скорость испарения может привести к охлаждению воды. В искусственных рыбоводных каналах заданную температуру можно поддерживать с высокой точностью, однако это требует больших затрат. Обычно осуществляется более экономичный режим, при котором для нагревания воды используется солнечная энергия, а для охлаждения — понижение температуры при испарении воды.

МОРСКИЕ СИСТЕМЫ

Около 71 % поверхности Земли покрыто водой, в основном соленой, которая поглощает почти всю энергию излучения. Диссипация энергии в океане происходит под действием сил трения, вза-

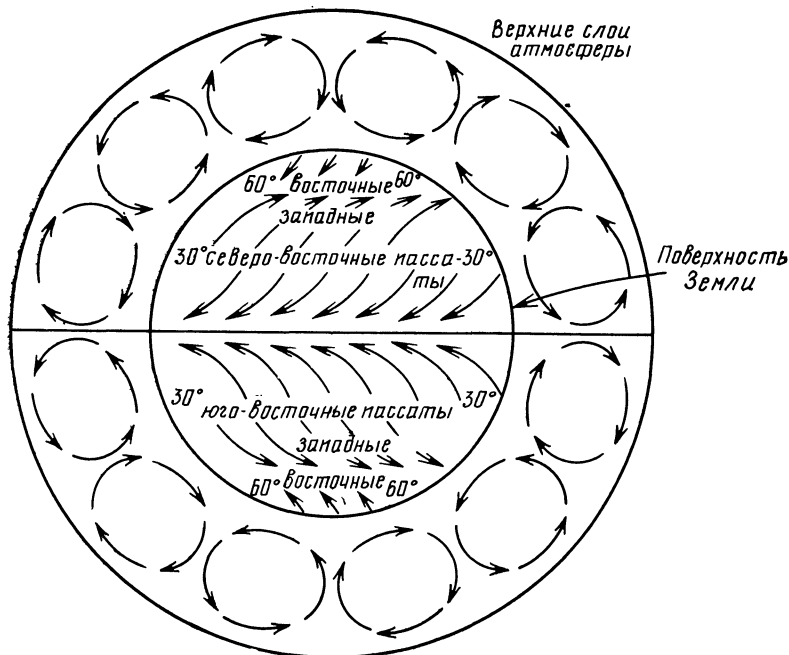


Рис. 3.10. Глобальная схема ветров

имодействия с атмосферой и переносом энергии из тропических областей в полярные. Перенос энергии к полюсам осуществляется в основном в результате океанической горизонтальной циркуляции.

Горизонтальная циркуляция. Океанические течения вызываются и поддерживаются атмосферной циркуляцией (ветрами), существованием градиентов плотности, которые обусловлены температурно-соленостными параметрами вод, и силами Кориолиса. На циркуляцию до некоторой степени влияют топография дна, географическая широта, определяющая температуру воды, а также расположение континентов.

Ветровая циркуляция осуществляется в основном в результате действия сил трения на поверхности раздела вода — воздух. Под действием сил трения перемещающиеся массы воздуха вовлекают поверхностные водные массы в движение в том же направлении, что приводит к образованию поверхностных течений. Этот тип циркуляции вызывается системой преобладающих ветров, а не отдельными штормовыми ветрами. На рис. 3.10 приведена схема глобальной атмосферной циркуляции. Эта модель, называемая иногда трехкамерной, имеет шесть тороидальных областей, окружающих земной шар: три в северном полушарии, три — в южном. В области экватора в результате нагревания происходит подъем

воздуха. Эти воздушные массы частично перемещаются к северу. На 30° с. ш. воздух опускается. Вблизи 60° с. ш. расположена вторая область подъема воздуха; часть его затем перемещается на север, часть на юг, где образуется вторая область циркуляции. Движущиеся на север воздушные массы, опускаясь у полюса, образуют третью область циркуляции. Три аналогичные области циркуляции существуют в южном полушарии.

Силы Кориолиса вызывают горизонтальное перемещение воздуха вблизи поверхности Земли и отклонение его в верхних слоях атмосферы вправо в северном полушарии и влево в южном. Под действием сил Кориолиса направление ветра образует угол с осью тороидальной области воздушной циркуляции. Результирующие ветры у поверхности Земли схематически изображены на рис. 3.10. Между экватором и 30° с. ш. ветры дуют с северо-востока и называются северо-восточными пассатами. Для области вблизи 30° с. ш., где в основном происходит опускание воздушных масс, характерны слабые приповерхностные ветры переменного направления. Эта область известна под названием «конских широт». Между 30 и 60° с. ш. дуют в основном западные ветры, возникающие также в результате действия сил Кориолиса на циркуляцию внутри тороидальной области. Между 60 и 90° с. ш. преобладают восточные полярные ветры. Аналогичная картина наблюдается и в южном полушарии.

Вблизи экватора, а также 60° ю. ш. и 60° с. ш. происходит подъем воздушных масс, в процессе которого воздух охлаждается. Поскольку влагосодержание холодного воздуха меньше, чем теплого, в этих районах выпадает много осадков. На 30° с. ш. и 30° ю. ш. воздух опускается. При этом он нагревается и его относительное влагосодержание снижается. Эти области циркуляции характеризуются довольно высокими скоростями испарения, поскольку сухой воздух входит в них по вертикали, а выходит по горизонтали.

В экваториальной области приповерхностные ветры дуют в направлении экватора, несколько отклоняясь к западу (см. рис. 3.10). Под действием сил трения на поверхности раздела вода — воздух эти ветры увлекают океаническую воду вдоль экватора в западном направлении. Такое направленное к западу экваториальное движение поверхностных вод существует во всех океанах. Континенты, встречающиеся на пути перемещения водных масс на запад, отклоняют экваториальные течения. Под действием силы Кориолиса течения отклоняются на север в северном полушарии и на юг в южном.

Гольфстрим — широко известное ветровое поверхностное течение в северной Атлантике. Это течение хорошо изучено у мыса Хаттерас (штат Северная Каролина), где оно имеет ширину 48 км, поверхностную скорость на границе 0,3 км/ч и максимальную поверхностную скорость в центральной части 8 км/ч. Скорость монотонно убывает с глубиной от максимального значения на поверхности до 0,03—0,3 км/ч на глубине 1525—2000 м (Brahtz,

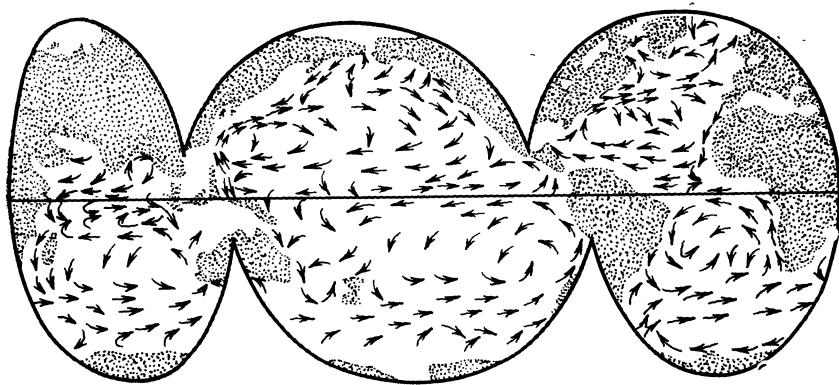


Рис. 3.11. Основные поверхностные течения в океанах южного полушария зимой

1968). Из изложенного очевидно, что термин «поверхностное течение» нельзя понимать буквально.

Гольфстрим — лишь одно из океанических течений. В каждом океане существуют круговые циркуляции; всего существует пять круговых циркуляций (рис. 3.11). Направления потоков определяются системой ветров, вызывающих циркуляцию, силой Кориолиса и условием неразрывности.

Кроме описанных основных круговых циркуляций, в океане есть множество других течений. Некоторые из них хорошо изучены, другие обнаружены лишь недавно. Вероятно, существуют еще необнаруженные течения.

Еще одно поверхностное океаническое явление имеет большое значение для рыболовства. Когда западные ветры встречаются на своем пути препятствия, например в виде гор, расположенных на западной границе Северной и Южной Америки, сила Кориолиса вызывает изменение направления ветров. В результате происходит сгон поверхностных вод, сопровождающийся уравниванием давлений и подъемом на поверхность вод из более глубоких слоев. Это явление называют апвеллингом. Воды более глубоких слоев океана богаче неорганическими питательными веществами, чем поверхностные воды, поэтому, несмотря на относительно низкую температуру вод апвеллинга, в них происходит бурное развитие планктона. Продуктивность районов апвеллинга и численность промысловых рыб в них очень высоки. В районах апвеллинга у побережья Перу осуществляется промысел анчоуса, много рыбы добывается также у западного побережья Африки.

Важное значение для рыболовства имеет горизонтальная циркуляция. Основные течения образуют гигантские круговороты и имеют довольно постоянное положение в океане. В этих районах наблюдается относительно высокая продуктивность. В центре круговых циркуляций существуют обширные области, где значительные поверхностные течения отсутствуют. В этих областях концен-

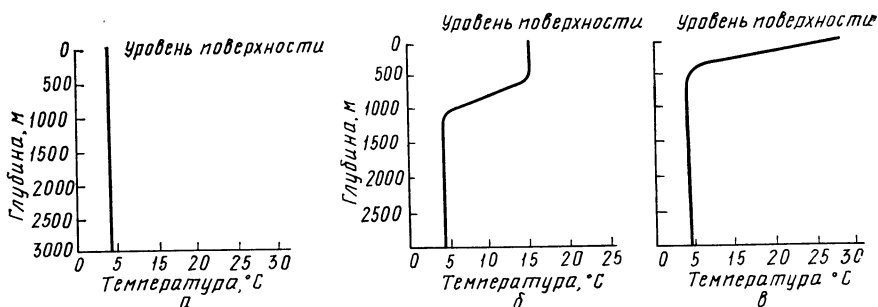


Рис. 3.12. Вертикальные профили температур полярных океанов (а), океанов умеренных широт (б), тропических океанов (в) (Williams, 1962)

трация питательных веществ и продуктивность низки, а скопления рыб слишком незначительны для ведения эффективного промысла. Таким образом, эти области бесполезны с точки зрения рыбного промысла; их можно сравнить с районами пустынь на суше. Типичным примером такой области в Северной Атлантике является Саргассово море.

Вертикальная циркуляция. Кроме горизонтальной циркуляции в океанах существует вертикальная циркуляция, возникающая в результате образования градиентов температуры и плотности. Как уже отмечалось в главе 2, плотность морской воды в отличие от пресной с понижением температуры возрастает непрерывно до точки замерзания, поэтому в океанах отсутствует полное сезонное вертикальное перемешивание. Полное перемешивание происходит в океане медленно — за 750—1000 лет в Атлантическом и за 1500—2000 лет в Тихом океане (Williams, 1962).

В океанах между 50—60° с. ш. и 50—60° ю. ш. существует ярко выраженный термоклин. В более высоких широтах температуры поверхностных и придонных вод близки между собой в результате вертикального перемешивания и низкой температуры воздуха. На рис. 3.12 приведены вертикальные профили температур для тропических, полярных океанов и океанов умеренных широт. В тропическом океане для довольно заглубленного термоклина характерно резкое снижение температуры с глубиной. В средних широтах термоклин начинается на малых глубинах, но температура снижается медленнее, в результате чего в умеренных широтах термоклин распространяется на большие глубины, чем в тропических океанах. В полярных океанах термоклин отсутствует, поскольку температуры поверхностных и придонных вод почти одинаковы. Существуют доказательства, что термоклин является граничным слоем, отделяющим направляющиеся к полюсам поверхностные потоки теплой воды от глубинных потоков холодной воды, направленных к экватору (Encyclopedia of Oceanography, 1966).

В тропических океанах глубина расположения термоклина и скорости изменения температуры с глубиной почти не изменяются

по сезонам. В умеренных широтах верхняя граница термоклина заглублена летом больше, чем зимой, величина уменьшения температуры на 1 м глубины летом также возрастает. Днем вблизи поверхности могут возникать небольшие локальные термоклины, исчезающие в ночное время, глубина их обычно не превышает 1 м.

Основная вертикальная циркуляция в океанах возникает в результате нагревания тропических вод и последующего их переноса поверхностными течениями в полярные районы. Здесь теплая вода охлаждается и опускается, поскольку ее плотность возрастает. Вблизи Антарктиды в результате замерзания части воды соленость остальной воды увеличивается. Возрастание плотности этой относительно соленой и холодной воды (34,6‰,—1,9°C) приводит к ее опусканию. Вода смешивается с циркумполярными водами и в придонном слое образует Антарктические придонные воды, которые перемещаются на север и образуют основную часть придонных вод океанов до 35° с. ш. (Williams, 1962).

Между 50 и 60° ю. ш. находится другая область опускания вод — Антарктическая конвергенция. Опускающиеся, так называемые промежуточные, антарктические воды распространяются на север над антарктическими придонными водами. Эти воды имеют соленость 33,8‰ и температуру около 2,2°C (Williams, 1962).

Еще одна область опускания воды — субтропическая конвергенция — находится между 30 и 40° ю. ш. Эта конвергенция не столь четко очерчена, как Антарктическая конвергенция, но она питает центральные водные массы южных океанов.

Северный Ледовитый океан окружен сравнительно невысокими порогами, которые препятствуют проникновению придонных вод, сформировавшихся в Северном Ледовитом океане, в Атлантический и Тихий океаны, поэтому формирование придонных вод северных районов океанов происходит в субантарктических областях. Придонные североатлантические водные массы формируются на северо-западе Лабрадорского бассейна и у северо-восточного побережья Гренландии. Здесь конвергенции образуются при опускании вод соленостью 34,9—34,96‰ и температурами 3,8—3,3°C (Williams, 1962). Поскольку объем этих вод ограничен и плотность меньше, чем у Антарктических придонных вод, понятно, почему большая часть придонных вод океанов формируется в Антарктике.

В северной зоне Атлантического океана на 45° с. ш. теплые соленые воды Гольфстрима смешиваются с холодными менее солеными водами Лабрадорского течения. Зимой эти воды охлаждаются, в результате увеличения плотности опускаются и образуют Арктическую конвергенцию. Таким образом происходит опускание субарктических вод. Субтропическая конвергенция, локализованная в районе 40° с. ш., 60° з. д. и в пределах направленного на восток течения Гольфстрим, порождает Арктические промежуточные воды. В Атлантический океан через порог Гибралтарского пролива поступают также воды Средиземного моря соленостью 36,5‰ и температурой около 12°C.

Субарктические придонные воды северной части Тихого океана формируются в Охотском море, к северу от Японии на широте около 55° с. ш. (Williams, 1962). Охлаждающиеся поверхностные воды в этом районе опускаются и перемещаются на юг Тихого океана. Объем образованных таким образом субарктических вод относительно невелик.

Промежуточные воды северной части Тихого океана образуются в зимний период в районе 40° с. ш., 160° в. д. при слиянии холодных вод направленного на юг течения Ойясио и перемещающихся на северо-восток теплых вод Куроисио. Промежуточные воды северной части Тихого океана отличаются от вод северной части Атлантического океана тем, что в Тихом океане при опускании промежуточных вод их место занимают большие массы обедненных кислородом подповерхностных вод. В связи с этим промежуточные воды северной части Тихого океана бедны кислородом. Этот фактор очень важен для развития морских организмов и объясняет несколько пониженную продуктивность значительных районов Тихого океана по сравнению с аналогичными районами Атлантического океана.

Центральные воды северной части Тихого океана формируются в зоне субтропической конвергенции внутри течения Куроисио в области $30-40^{\circ}$ с. ш., $150-160^{\circ}$ з. д. (Williams, 1962).

Вертикальная циркуляция океанов обеспечивает относительно высокое содержание кислорода в глубоководных слоях. Без такого круговорота протекание биологических процессов привело бы к исчезновению кислорода в нижних слоях океана и, следовательно, к прекращению любых форм жизни во всех слоях океана, за исключением тонкого поверхностного слоя. Вертикальная и горизонтальная циркуляции действуют как огромный насос для перекачивания энергии из тропических областей в полярные. Эти циркуляционные системы обеспечивают также перенос кислорода и двуокиси углерода из полярных районов в тропические. В результате вертикальной циркуляции, как бы медленно она ни протекала, поддерживается баланс концентрации кислорода, двуокиси углерода и других газов в глубинных слоях океанов.

Условия природной среды океанов, особенно ниже слоя термоклина, исключительно стабильны. Градиенты солености в $1-2\%$ наблюдаются довольно редко, изменение температуры на больших площадях в океане часто не превышает нескольких градусов. В этих условиях происходит адаптация морских организмов к ограниченному числу факторов природной среды. Однако большая часть промысловых рыб не имеет такого преимущества, поскольку вынуждена приспосабливаться к изменяющимся поверхностным условиям. Многие рыбы обладают способностью различать градиенты температур менее 1°C . В этом рыбы конкурируют с самыми чувствительными приборами для измерения температур, созданными человеком. Океаническая циркуляция обеспечивает также стабильность значений pH и других факторов окружающей среды.

СОЛОНОВАТОВОДНЫЕ СИСТЕМЫ

Соленость океанских вод составляет около 35 ‰, пресные воды имеют нулевую соленость. На участках впадения рек в океан соленость постепенно возрастает от нуля до 35 ‰. Такие области с солоноватой водой называются эстуариями. С биологической точки зрения эстуарии обычно имеют высокую продуктивность и играют важную роль в жизни многих океанических организмов. Процесс воспроизводства многих океанических рыб происходит в солоноватой воде. Многие морские животные, в том числе и промысловые, обитают только в солоноватых водах. К ним относятся, в частности, устрицы и различные виды двустворчатых моллюсков. Таким образом, водные системы с солоноватой водой имеют огромное значение для промышленного рыболовства и аквакультуры.

Тепловые характеристики эстуариев очень сложны и значительно различаются. Поскольку в эстуариях происходит смешение пресной и соленой воды, результирующая плотность воды определяется температурой и соленостью. Как уже отмечалось в главе 2, плотность воды соленостью менее 25 ‰ при температурах несколько выше точки замерзания больше, чем в точке замерзания. Таким образом, эстуарии, имеющие соленость вод меньше 25 ‰, обладают многими свойствами пресноводных систем; для них, в частности, характерно перемешивание. При солености выше 25 ‰, когда максимальная плотность воды достигается в точке замерзания, эстуарии по своим характеристикам приближаются к океаническим системам.

На характеристики эстуариев огромное влияние оказывают приливы. Во время прилива в эстуарий проникают океанические воды, а во время отлива солоноватые воды уходят из эстуария. Скорость прилива в эстуарии зависит от его физических размеров: часто она достигает 2,5 м/с; в некоторых случаях вдвое больше. В результате действия прилива в эстуарии возникают колоссальные силы перемешивания. Специалисты по аквакультуре должны учитывать эти силы при расчете устанавливаемых в эстуариях подводных заградительных сооружений.

Скорость и объем потока пресной воды, входящего в верхнюю зону эстуария, зависят от характеристик источника пресной воды. Сильные дожди, выпавшие в районе бассейна реки, могут существенно нарушить нормальные условия в эстуарии. Такое нарушение наблюдалось, например, во время прохождения урагана Агнес. Сток в Чесапикский залив увеличился на порядок, что вызвало смещение границы пресных вод в заливе на 50 миль. Такие изменения оказались губительными для некоторых организмов эстуария, например для некоторых двустворчатых моллюсков. На перемешивание и циркуляцию в эстуариях влияют также ветровые силы, причем, как правило, тем сильнее, чем больше размеры эстуария. Штормовые морские ветры также оказывают влияние на эстуарии, поскольку обычно увеличивают скорость приливов.

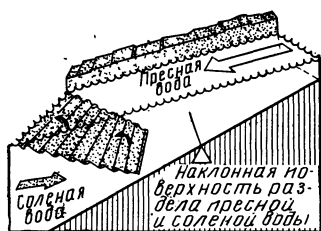


Рис. 3.13. Эстуарий с галоклином (Williams, 1962)

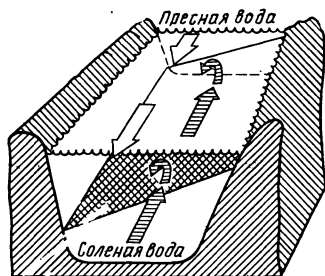


Рис. 3.14. Эстуарий с горизонтальной границей (Williams, 1962)

Существует четыре классических типа циркуляционных систем, характеризующих условия в эстуарии: эстуарий с галоклином *, эстуарий с горизонтальной границей, эстуарий с вертикальной границей, вертикально и горизонтально однородный эстуарий. Иногда как отдельный, пятый тип эстуариев выделяют фьорды.

Эстуарий с галоклином (рис. 3.13) образуется, когда речной сток превосходит приливный поток и отношение ширины эстуария к его глубине относительно мало. Примером эстуария такого типа может служить устье реки Миссисипи. Речная пресная вода, имеющая меньшую плотность, течет над соленой водой. Если бы верхняя граница клина соленой воды представляла собой гладкую невозмущенную поверхность, распространение воды происходило бы до точки, где превышение дна реки над уровнем поверхности моря равно нулю (см. рис. 3.13). Однако из-за значительной инерции речной воды граница клина соленой воды смещается вниз по течению тем дальше, чем больше объем речного стока. На поверхности раздела клина соленой и речной воды происходит интенсивное перемешивание. Однако это перемешивание неполное; образовавшаяся в результате частичного перемешивания более легкая вода вытекает из эстуария над слоем соленого клина. Более полное перемешивание происходит при движении водных масс эстуария вниз по течению.

Горизонтальная граница в эстуарии образуется, если отношение объема речного стока к приливному потоку уменьшается в результате увеличения приливного потока или уменьшения речного стока. Увеличение отношения ширины эстуария к глубине приводит к образованию горизонтальной границы, поскольку в этом случае увеличивается приливный поток. Относительное возрастание приливного потока вызывает интенсивное перемешивание, разрушающее клин соленой воды. В результате возникает слой перемешанной воды над относительно горизонтальной поверхностью. Эстуарий с горизонтальной границей схематично показан на рис. 3.14. На рисунке граница слоя горизонтального перемешивания имеет некоторый наклон, вызванный действием силы Корио-

* Галоклин — резкий градиент солености на определенной глубине. — Прим. ред.

лиса. Втекающая в эстуарий соленая вода под действием силы Кориолиса отклоняется вправо (в северном полушарии). Пресная вода, текущая в противоположном направлении, также отклоняется под действием силы Кориолиса вправо относительно направления течения, т. е. к противоположной стороне эстуария. Наклон увеличивается, пока сила Кориолиса не уравнивается возникающей разностью плотностей.

В эстуарии с горизонтальной границей перемешивание происходит на большой площади. В таком эстуарии соленая вода движется вверх по течению в нижних слоях, а менее соленая вода — по течению в поверхностных слоях. Поток соленой воды в устье намного превышает поток пресной воды. Например, в устье Чесапикского залива, который является примером эстуария с горизонтальной границей, поток морской воды в 39 раз превышает поток пресной воды.

Эстуарии с вертикальной границей возникают в результате значительного возрастания скоростей прилива, когда резко увеличивается сила Кориолиса. В этих эстуариях слой перемешивания расположен почти в вертикальной плоскости (рис. 3.15). Соленая вода втекает в эстуарий справа (если смотреть вверх по течению, в северном полушарии), а пресная вода вытекает в левой части эстуария. Примером эстуария с вертикальной границей является эстуарий реки Раритан в штате Нью-Джерси.

В природе существует очень мало горизонтально- и вертикально-однородных эстуариев, поскольку для осуществления такой однородности поперечное сечение эстуария должно иметь строго определенную конфигурацию. Эстуарий должен быть достаточно узким, для предотвращения прохождения любого потока вверх по течению. Длина эстуариев может лишь в несколько раз превышать амплитуду приливного перемещения вод. Перемещение соленой воды вверх по течению в таких эстуариях осуществляется только за счет турбулентности.

Фьорды иногда классифицируют как особый тип эстуариев. Фьорд представляет собой длинное узкое углубление береговой линии с небольшой глубиной порога и характерен для районов, в которых осадки и сток превышают испарение. Пресная вода вытекает из фьорда в близких к поверхности слоях, а некоторое количество соленой воды может втекать в него через порог. Ниже уровня порога образуется резервуар относительно стоячей воды, часто с низким уровнем содержания кислорода.

Таким образом, тип циркуляции в эстуарии зависит от параметров речного стока, скорости прилива, ширины и глубины эстуария. При прочих равных условиях с уменьшением речного стока, увеличением скорости прилива, ширины и глубины эстуария тип

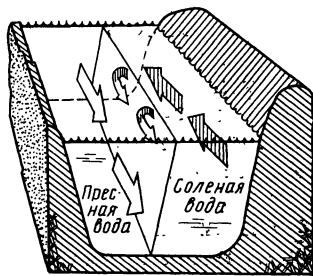


Рис. 3.15. Эстуарий с вертикальной границей (Williams, 1962)

эстуария изменяется от эстуария с клином соленой воды к эстуарию с горизонтальной границей и затем к эстуарию с вертикальной границей.

Если речной сток велик по сравнению с приливным, возникнет большой градиент солености и перемешивание обусловлено только подповерхностными волнами. Когда приливное течение превышает речной сток, клин соленой воды разрушается в результате перемешивания, возникшего при увеличении скоростей прилива. Возникает эстуарий с горизонтальной границей. Дальнейшее увеличение скоростей прилива еще больше увеличивает перемешивание и в результате действия силы Кориолиса приводит к возникновению эстуария с вертикальной границей. Увеличение ширины вызывает уменьшение скорости в данной точке и, как следствие, уменьшение эффективного стока или скорости. Таким образом, расширение эстуария оказывает такое же действие, как и уменьшение речного стока. Увеличение глубины эстуария уменьшает скорость прилива и, следовательно, влияет на изменение типа эстуария, так же как и уменьшение скорости прилива. Эстуарий с горизонтальной и вертикальной однородностью обязательно должен быть нешироким.

В действительности далеко не во всех эстуариях наблюдаются картины циркуляций, аналогичные описанным выше. Например, в Балтиморской гавани — эстуарии Чесапикского залива — наблюдается четырехслойная циркуляция: в двух слоях вода переносится вверх по течению, в двух — вниз по течению. Каждый эстуарий является целостной системой, и для установления характерной для него картины циркуляции необходимо проведение соответствующих наблюдений. Со временем характер циркуляции в эстуарии может изменяться в зависимости от внешних факторов, например при весеннем увеличении речного стока.

При расчете энергетического баланса эстуария учитываются те же возможности получения и расхода энергии, что и для озера. Кроме того, важную роль для эстуария играет приливный поток. Энергетический баланс определяется влияющей на плотность соленостью, объемом и температурой речного стока, объемом и температурой приливного потока, конфигурацией и размерами эстуария, величиной солнечного излучения и скоростью испарения. Эти факторы также определяют характер циркуляции эстуария.

Циркуляция и энергетические соотношения, характерные для природных водоемов, являлись предметами длительных дискуссий. Вопрос о том, в какой мере эти проблемы касаются рыбного хозяйства и аквакультуры, будет рассмотрен в последующих главах. Однако уже здесь полезно привести несколько характерных примеров. Для существования многих промысловых видов рыб, а также видов, пригодных для искусственного разведения, требуется кислород и определенные температуры воды. Знание характера циркуляции водоема и среды обитания данного вида рыб позволяет с большей точностью локализовывать скопления. Для поиска скоплений некоторых видов рыб уже сейчас используются тем-

пературные данные. Картирование поверхностных температур океанов и больших озер может производиться методом дистанционного спутникового зондирования. При устройстве хозяйств аквакультуры знание картины циркуляции может способствовать правильному расположению водозаборных устройств и садков. Например, для эффективной работы устричных ферм соленость воды должна составлять 17‰ или больше. Следовательно, при создании устричной фермы в эстуарии для получения воды необходимой солености следует брать воду из придонных слоев эстуариев с горизонтальной циркуляцией или из правой части (если смотреть вверх по течению, находясь в северном полушарии) эстуария с вертикальной циркуляцией. Несколько приведенных примеров показывают необходимость изучения характера циркуляции природных водоемов. В последующих главах будут приведены другие примеры.

ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ НА ЖИЗНЬ ВОДНЫХ ОРГАНИЗМОВ

Влияние температуры на рост растений проявляется по-разному. Для различных видов растений характерны разные минимальные, максимальные и оптимальные температуры, так же как и условия освещенности. На рисунке 3.16 показано влияние температуры на скорость фотосинтеза *Chlorella pyrenoidosa*. В целом форма кривой одинакова для большинства растений, однако различным видам присущи разные значения минимальной, максимальной и оптимальной температур. Подобными кривыми обычно описывается влияние температуры на живые организмы. Как правило, на них обозначена нижняя точка, характеризующая условие гибели организма, которая для большинства водных организмов соответствует температуре замерзания. Выше этой точки величина продукции растёт с повышением температуры, однако эта зависимость редко бывает линейной. После достижения максимума при дальнейшем повышении температуры наблюдается уменьшение продукции до наступления гибели. Обычно зависимость величины продукции от температуры описывается уравнением второго или третьего порядка, часто она представляет собой параболу. Такой вид зависимости обычно характерен как для животных, так и для растений.

Вид кривой зависимости величины продукции от температуры (см. рис. 3.16) может меняться под влиянием различных факторов. Здесь очень важно определение понятия продукции. Термин «общая продукция» обычно

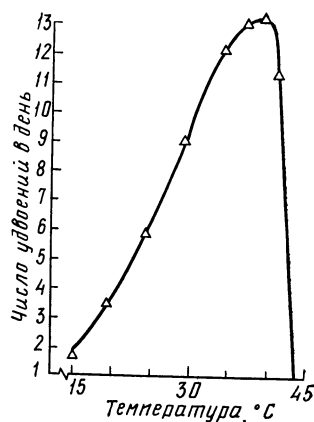


Рис. 3.16. Влияние температуры на скорость роста синхронизированных культур *Chlorella pyrenoidosa* (Soroikin and Krauss, 1962)

подразумевает продукцию организмов при отсутствии потерь на дыхание. Термин «чистая продукция» используется для определения действительно произведенного, пригодного к потреблению, обычно органического продукта. Общая продукция за вычетом потерь на дыхание равна чистой продукции.

От температуры зависит не только величина общей и чистой продукции, но и дыхание. Как правило, для каждого отдельного организма кривая зависимости дыхания от температуры имеет в основном тот же вид, что и кривая зависимости величины продукции от температуры. Однако, в сущности, это не обязательно, особенно для растений. Если вид кривой дыхания отличается от вида кривой общей продукции, характер кривой величины чистой продукции также должен быть другим.

Влияние температуры на продуктивность любого организма неразрывно связано с воздействием температуры на течение химических реакций. Большинство жизненно важных процессов можно представить как серию химических реакций, катализируемых ферментами. Обычно при повышении температуры происходит ускорение химических реакций в результате увеличения кинетической энергии атомов. Однако многие соединения, присутствующие в живых организмах, нестабильны при температурах 35—150 °C. Некоторые соединения деактивируются при температурах ниже 35 °C. Эти факты позволяют объяснить ход кривых зависимости продукции от температуры для большинства организмов. При достаточно низких температурах некоторые принципиально важные для жизнедеятельности реакции не идут вообще или протекают слишком медленно для обеспечения жизнедеятельности организмов. Это и есть минимальная температура, при которой возможно существование организмов. При повышении температуры скорость химических реакций возрастает, что обеспечивает рост организма. При дальнейшем повышении температуры кинетическая энергия становится достаточной для разрушения некоторых необходимых химических соединений. Это уменьшает скорость химических реакций и приводит к снижению скорости роста. При определенных значениях температуры происходит полное разрушение жизненно важных химических соединений, приводящее к гибели организма.

Однако кроме описанных выше изменений химических соединений существуют другие причины гибели организмов, когда температура превышает определенное значение.

Все или почти все химические реакции, протекающие в живых организмах, катализируются ферментами (органическими катализаторами). В качестве катализаторов они определяют скорость химических реакций. Скорость протекания химических реакций и скорость роста организмов зависят от концентрации ферментов и воздействующей на них температуры окружающей среды. На рис. 3.17 показано влияние концентраций субстрата на скорость реакций. Аналогичный вид имеет график зависимости скорости реакций от концентрации фермента. Увеличение концентрации

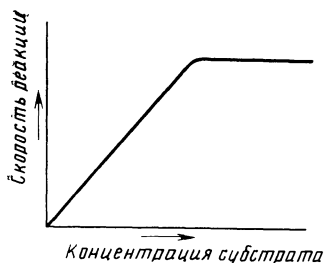


Рис. 3.17. Типичный пример влияния концентрации субстрата на скорость реакции, катализируемой ферментами

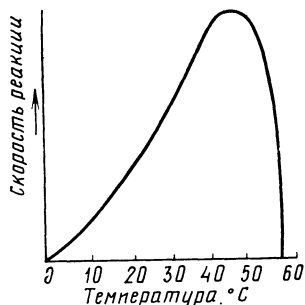


Рис. 3.18. Типичный пример влияния температуры на скорость реакции, катализируемой ферментами (Devlin, 1966)

субстрата приводит к ускорению реакции в результате увеличения числа активных центров. При некоторой концентрации субстрата все ферментное вещество оседает на активные центры. Дальнейшее увеличение числа активных центров при увеличении концентрации субстрата не влияет на скорость реакции, поскольку все ферментное вещество уже использовано, а без него протекание реакции невозможно.

Повышение температуры приводит к увеличению кинетической энергии молекул фермента и субстрата, что вызывает рост числа контактов молекул фермента и субстрата. При этом возрастает скорость реакции, поскольку увеличивается вероятность того, что молекула фермента осядет на активный центр субстрата. Однако при повышении температуры фермент начинает разрушаться, концентрация его уменьшается и реакция замедляется. Каталитические свойства многих ферментов ослабевают при температуре 35°C и полностью утрачиваются при температуре 60°C (Devlin, 1966). На рис. 3.18 показано влияние температуры на скорость катализируемой ферментами реакции. Однако поскольку большинство водных организмов не могут существовать при температурах, превышающих 30—35°C, разрушение ферментов не является основной причиной их гибели. Химические реакции в значительной степени определяют метаболизм пойкилотермных (холоднокровных) животных и именно с этой точки зрения необходимо подходить к обсуждению вопросов термального стресса и гибели животных при повышении температуры окружающей среды.

При проектировании оборудования для культивирования водных организмов необходимо знать температуру, при которой наступает их гибель. Однако этого недостаточно, поскольку характер влияния изменения температуры на рыб необычайно сложен. Необходимо учитывать, по крайней мере, три параметра: температуру акклимации, термального шока и температуру, при которой наступает гибель.

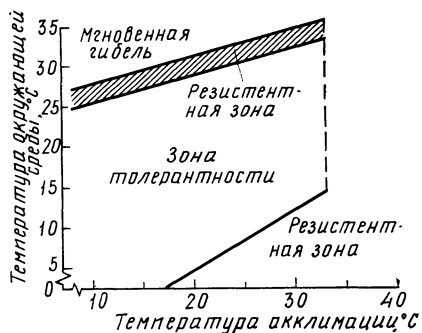


Рис. 3.19. Диаграмма температурной толерантности для плотвы *Rutilus rutilus* (Cocking, 1959)

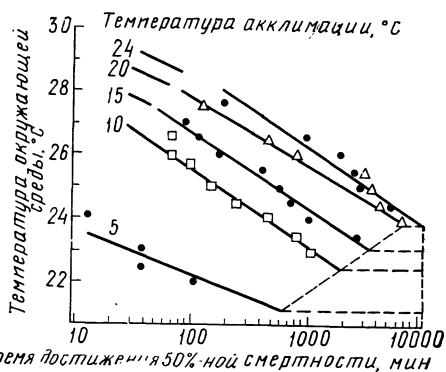


Рис. 3.20. Время достижения 50%-ной смертности молоди горбуши при повышенных температурах для различных температур акклимации (Brett, 1952)

На поверхности жабр кровь рыб практически соприкасается с водой, что облегчает транспорт кислорода, а также интенсивную теплопередачу вследствие высокого коэффициента теплоотдачи воды. Эта теплопередача настолько велика, что рыбы не могут существовать при больших различиях между температурами тела и окружающей водной среды, так как энергетические потребности очень высоки. В процессе эволюции рыбы сформировались как пойкилотермные животные — их ткани способны существовать в некотором температурном интервале; в определенном температурном интервале протекают у них и все биологические процессы. У рыб развилась способность адаптироваться к различным температурам при условии, что температурные изменения происходят не слишком быстро. Адаптация к изменяющейся в определенных пределах температуре окружающей среды называется акклимацией.

Процесс акклимации должен происходить достаточно медленно, чтобы физиологические процессы могли адаптироваться к изменению температуры. При повышении температуры акклимация происходит значительно быстрее, чем при ее понижении. Для акклимации при повышении температуры на 5°C может потребоваться от нескольких часов до одного-двух дней, тогда как при понижении температуры на такую же величину для этого потребуются несколько дней (Brett, 1956). Замечено, что для некоторых видов рыб низкая концентрация кислорода замедляет акклимацию при повышении температуры (Brett, 1956).

На рис. 3.19 представлена диаграмма температурной толерантности для плотвы. Область толерантности определяет температуру акклимации и окружающей среды, при которых время существования рыб неограниченно. Область резистентности определяет температурный режим, который рыбы могут выдерживать лишь в

течение ограниченного периода времени. За пределами области резистентности наступает мгновенная гибель организма. Очевидно, что гибель рыб как в зоне резистентности, так и за ее пределами наступает в результате воздействия высоких температур на их центральную нервную систему, хотя конкретная причина (механизм) такого воздействия неизвестна (Brett, 1956).

На начальном этапе исследований ученые столкнулись с сложностью определения положения границы между резистентной и толерантной областями, поскольку оно зависит от времени экспозиции. В группе акклиматизированных рыб, помещенных в испытательную камеру, температура в которой находится в пределах резистентной зоны, наблюдается смертность. Зависимость числа случаев смертности от времени называется кривой смертности. Проводя серию экспериментов, в которых окружающая температура изменяется, а температура акклиматизации остается постоянной, можно получить серию кривых смертности. Зависимость логарифмов времени достижения 50 %-ной смертности от температуры представлена на рис. 3.20. Эта полулогарифмическая зависимость линейна, причем наклон прямых почти одинаков для всех видов, хотя отрезки, отсекаемые ими на оси координат, различны. Существенно, что в определенный момент времени наклон кривой внезапно изменяется и она становится горизонтальной (Brett, 1956). Дальнейшее увеличение времени экспозиции не вызывает возрастания смертности. Температура, при которой происходит изменение наклона, является летальной и соответствует переходу из резистентной зоны в толерантную.

Изменение температуры акклиматизации приводит к изменению и летальной температуры. Повышение температуры акклиматизации обычно вызывает увеличение верхней, а иногда также и нижней летальной температуры; понижение температуры акклиматизации дает противоположный эффект. Данной температуре акклиматизации и температуре LD_{50} (температуре, при которой гибнут 50 % подопытных животных) соответствует одна точка на границе области в двухмерном пространстве. На рис. 3.21 представлена летальная область для американского леща. Отметим, что при повышении температуры акклиматизации на 5°C верхняя летальная температура возросла всего на $1,3^{\circ}\text{C}$. В данном случае нижняя летальная температура при повышении температуры акклиматизации изменяется нелинейно, хотя для некоторых рыб характерен ее линейный рост; скорость повышения нижней летальной температуры увеличивается при температурах акклиматизации, превышающих 12°C .

Конфигурация, размеры и другие характеристики летальной области специфичны для различных видов, но вполне воспроизводимы для каждого данного вида. Значение летальной температуры для любого вида рыб при температуре акклиматизации может быть воспроизведено с точностью до $0,2^{\circ}\text{C}$ (Brett, 1956). Однако имеющихся данных недостаточно для построения замкнутых летальных областей для всех видов рыб. Значительная часть имеющихся данных сведена в табл. 3.2.

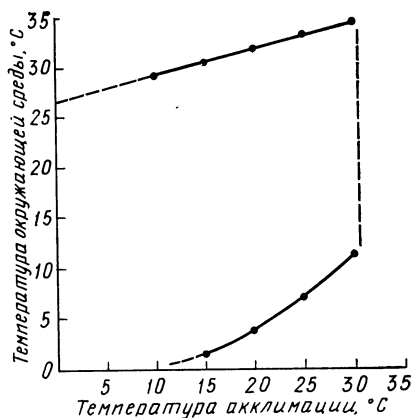


Рис. 3.21. Летальная область для американского леща (Brett, 1956)

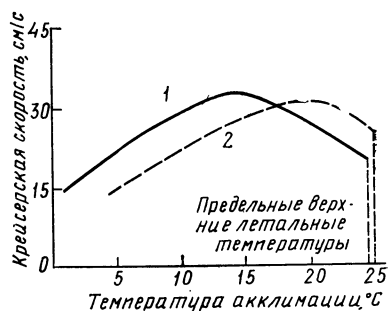


Рис. 3.22. Зависимость крейсерской скорости от температуры акклимации нерки (1) в возрасте 4—6 мес, и кижуча (2), выращенного в тех же условиях. Крейсерские скорости приведены к средним значениям длин 6,9 и 5,4 см соответственно (Brett et al., 1958)

Летальные области строятся для условий, при которых стресс вызывается только температурными изменениями. Обычно при наличии других параметров, вызывающих стресс, значение летальной температуры изменяется. Проводились исследования влияния изменения температуры акклимации и солености на верхнюю летальную температуру двусторчатых моллюсков *Modiolus demissus* (Waugh and Garside, 1971) (табл. 3.3). Полученные изменения верхней летальной температуры весьма значимы, хотя и малы по абсолютной величине.

Верхние летальные температуры для фундулуса *Fundulus diaphanus* составляли 27,5, 33,5 и 27,5°C при соленостях 0, 14 и 32 ‰ соответственно (Garside and Jordan, 1968). Аналогичные данные относительно влияния солености на верхнюю летальную температуру для трехиглой колюшки *Gasterosteus aculeatus* приведены в табл. 3.4. (Jordan and Garside, 1972). Наивысшая летальная температура была зарегистрирована для солености, равной 12 ‰, независимо от солености и температуры акклимации. При отклонении солености от этого значения в любую сторону значение верхней летальной температуры уменьшается. Стрессы, вызванные другими факторами, также понижают верхнюю летальную температуру.

Летальная температура является важным фактором, определяющим возможность существования данного вида в определенных природных условиях. Однако уже при температурах несколько ниже температур верхней резистентной зоны, а также при температурах выше соответствующих границе нижней резистентной зоне рыбы находятся в состоянии стресса и теряют свою конкурентоспособность, поскольку они не могут нормально функционировать. При создании искусственных систем обычно стремятся

Т а б л и ц а 3.2. Зависимость от температуры акклимации верхней и нижней летальных температур для различных видов рыб

Название	Вид	Семейство	Верхняя (В) и нижняя (Н) летальные температуры, соответствующие различным температурам акклимации, °С						Источник
			5	10	15	20	25	30	
Горбуша	<i>Oncorhynchus gorbusha*</i>	Лососевые	В 21,3	22,5	23,1	23,9			Brett, 1952
Кета	<i>Oncorhynchus keta*</i>	Лососевые	Н 21,8	22,6	23,1	23,7			Brett, 1952
Нерка	<i>Oncorhynchus nerka*</i>	Лососевые	В 22,2	23,4	24,4	24,8			Brett, 1952
Кижуч	<i>Oncorhynchus kisutch*</i>	Лососевые	Н 0,0	3,1	4,1	4,7			Brett, 1952
Чауяча	<i>Oncorhynchus tshawytscha*</i>	Лососевые	В 22,9	23,7	24,3	25,0			Brett, 1952
Голец	<i>Salvelinus fontinalis</i>	Лососевые	Н 0,2	1,7	3,5	4,5			Brett, 1952
Желтый окунь	<i>Perca flavescens</i>	Окуновые	В 23,7**	24,4**	25,0	25,3	25,3	25,3	Fry, Hart and Walker, 1946
Изумрудный шайнер	<i>Notropis atherinoides</i>	Карповые	В 21,3	25,0	27,7		0,5	0,5	Hart, 1947
Чукучан	<i>Celostomus commersonni</i>	Чукучановые	В 23,2	26,7	28,9	20,7	3,7	3,7	Hart, 1947
Черноносый ринихт	<i>Rhinichthys atratulus</i>	Карповые	В 26,3	27,7	1,6	5,2	8,0	8,0	Hart, 1947
Калифорнийская гирелла	<i>Girella nigricans</i>	Гирелловые	В 26,5	28,8	29,6	2,2	2,2	2,2	Hart, 1952
Шайнер обыкновенный	<i>Notropis cornutus</i>	Карповые	В 28,7	28,7	31,4	31,4	31,0	31,0	Doudoroff, 1952
Семотилос	<i>Semotilus atromaculatus</i>	Карповые	В 5,0	29,6	30,3	8,0	31,0	31,0	Hart, 1947
Северная доросома	<i>Dorosoma dapedionum</i>	Сельдевые	В 24,7	27,3	29,3	30,3	30,3	30,3	Hart, 1952
Хиборинхус	<i>Huorhynchus notatus</i>	Карповые	В 26,0	28,3	30,6	31,7	33,3	33,3	Hart, 1952
Черноголовый пимефалес	<i>Pimephales promelas</i>	Карповые	В 28,2	28,2	1,0	4,2	7,5	—	Hart, 1947
Ушастый окунь	<i>Lepomis macrochirus</i>	Центрархидовые	В 30,7	31,5	30,7	31,5	38,8?	38,8?	Hart, 1952
Американский лещ	<i>Notemigonus crysoleucas</i>	Карповые	В 2,5	5,0	2,5	5,0	7,5	7,5	Hart, 1952
			В 33,2	31,8	30,5	31,8	33,2	33,2	Hart, 1952
			В 1,5	4,0	1,5	4,0	7,0	7,0	Hart, 1952

Название	Вид	Семейство	Верхняя (В) и нижняя (Н) летальные температуры, соответствующие различным температурам акклимации, °С							Источник
			5		10	15	20	25	30	
Большеротый американский черныи окунь	Micropterus salmoides	Центрархидовые	В				32,5	34,5	36,4	Hart, 1952
Американский сомик	Ictalurus punctatus	Американские сомики	В			30,3	32,8	33,5	11,8	Hart, 1952
Гамбузия	Gambusia affinis	Пецилиевые	В			0,0	2,5	6,0		
			В			35,4	37,3	37,3	37,3	Hart, 1952
Американский сомик	Ictalurus nebulosus	Кошачьи сомы (икталуриды)	В	28,6	30,2	31,8	33,4	35,0	36,5	Brett, 1944
	Carassius auratus	Карповые	В	29,0**	30,8	32,8**	34,8**	36,6**	38,6**	Fry, Brett and Clawson, 1942
Мия (песчаная ракушка) (взрослая)	Mya arenaria (взрослые)		В	30,3	30,5	30,5	31,0	32,1	32,5	Kennedy and Mihursky, 1971
	Мия (песчаная ракушка) (возраст менее года)		В	30,9	31,6	31,6	32,4	32,6	34,4	Kennedy and Mihursky, 1971
Двустворчатый моллюск	Gemma gemma		В	35,6	37,2	37,2	35,6	35,6	37,0	Kennedy and Mihursky, 1971
	Мулния		В	30,2*****	31,6		32,4	33,5		Kennedy and Mihursky, 1971
Балтийская макома (большая)	Mascoma balthica (large)	Теллиниды	В	30,8	31,1	31,5	32,6	33,3*****	34,1	Kennedy and Mihursky, 1971
Балтийская макома (малая)	Mascoma balthica (small)	Теллиниды	В	31,2	31,5	32,0	32,9	33,5*****	34,1	Kennedy and Mihursky, 1971
Морской гребешок	Placostecten		В	22,1	22,9	24,0				Dickie, 1958
Плотва	Rutilus rutilus		В		29,0	31,0*****			32,3	Cocking, 1959

* Только для молоди в пресноводных системах.

** Оценка получена методом графической интерполяции.

*** Предварительные результаты; требуются дальнейшие исследования.

**** Акклимированы при 2°C.

***** Температура акклимации 36°C.

***** Температура акклимации 33°C.

Таблица 3.3. Влияние температуры акклимации и солености на верхнюю летальную температуру для двусторчатых моллюсков *Modiolus demissus* (Waugh and Garside. 1971)

Соленость, при которой осуществляется акклимация, ‰	Температура акклимации, °C	Соленость окружающей среды, ‰	Верхняя летальная температура, °C	Соленость, при которой осуществляется акклимация, ‰	Температура акклимации, °C	Соленость окружающей среды, ‰	Верхняя летальная температура, °C
5	15	5	38,4	15	25	28	38,5
		15	38,5			5	37,4
		28	38,2			15	39,4
		5	39,0			28	39,4
		15	38,4		15	5	38,8
		28	37,8			15	38,8
	25	5	38,7			28	39,6
		15	38,4			5	38,6
		28	38,0		20	15	38,8
		5	38,4			28	39,5
	15	15	39,1			5	39,1
		28	38,2		25	15	39,0
15	15	5	38,2			28	40,2
		15	39,1				
		28	38,2				
		5	38,2				
		15	39,1				
		28	38,2				
	20	5	38,2				
		15	39,1				
		28	38,2				
		5	38,2				
		15	39,1				
		28	38,2				

Таблица 3.4. Влияние осмотического стресса (изменение солености) на верхнюю летальную температуру для трехиглой колюшки *Gasterosteus aculeatus* (Fordan and Garside, Canadian Journal of Zoology, Volume 50, p. 1405—1411, 1972).

Соленость, при которой осуществляется акклимация, ‰	Температура акклимации, °C	Соленость окружающей среды, ‰	Верхняя летальная температура, °C	Соленость, при которой осуществляется акклимация, ‰	Температура акклимации, °C	Соленость окружающей среды, ‰	Верхняя летальная температура, °C
0	10	0	25,7	30	20	0	26,8
		12	27,9			12	28,6
		30	21,6			30	26,2
	20	0	27,2		10	0	23,6
		12	27,7			12	28,0
		30	24,8			30	25,7
12	10	0	23,3		20	0	26,8
		12	28,4			12	28,8
		30	23,2			30	27,6
	20	0	23,3		10	0	23,6
		12	28,4			12	28,0
		30	23,2			30	25,7

к получению максимальной прибыли. Поскольку содержание рыб, находящихся в состоянии стресса, менее выгодно, температурный режим системы не должен устанавливаться исходя из значений летальных температур. Допустимое сужение температурного интервала определяется из условий минимизации стресса.

Для определения степени температурного стресса рыб обычно используют косвенные методы измерения. Один из них заключается в измерении крейсерской скорости рыб при различных температурах. На рис. 3.22 представлена зависимость крейсерской скорости от температуры акклимации: при увеличении температуры скорость сначала достигает максимума, а затем убывает. Температура, соответствующая наибольшей скорости, обеспечивает оптимальные условия выживания рыб. Она несколько ниже минимальной температуры термального стресса.

Косвенным методом определения влияния термального стресса может служить измерение скорости метаболизма или такого его показателя, как потребление кислорода. Фрай и Харт (Fry and Hart, 1946) определяли зависимость стандартного и максимального потребления кислорода от температуры для серебряного караса *Carassius auratus*. Стандартное потребление кислорода — количество кислорода, необходимое для поддержания основного обмена при определенной температуре. Кривая максимального продолжительного потребления кислорода строится с учетом стандартного потребления кислорода, кислорода, необходимого для активной жизнедеятельности, а также поглощенного сверх основного уровня обмена при увеличении интенсивности дыхания и кровообращения. Если последней величиной пренебречь или объединить ее с потреблением кислорода, необходимого для поддержания жизнедеятельности, разность между максимальным и стандартным потреблением кислорода даст величину потребления кислорода, необходимого для поддержания жизнедеятельности при любой температуре. На рис. 3.23 приведены скорости максималь-

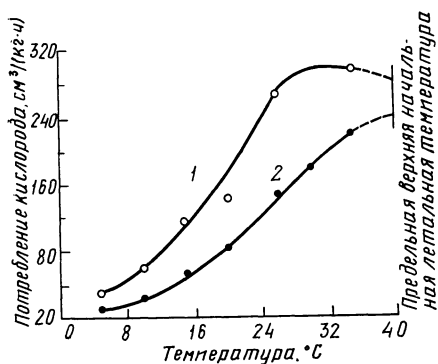


Рис. 3.23. Активное (1) и стандартное (2) потребление кислорода серебряным карасем (Fry and Hart, 1946)

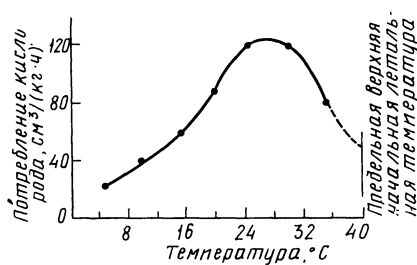


Рис. 3.24. Разность между стандартным и активным потреблением кислорода серебряным карасем (Fry and Hart, 1946)

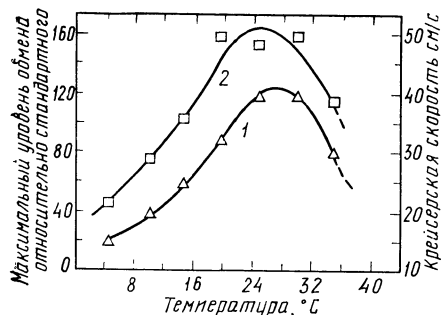


Рис. 3.25. Максимальный уровень обмена по сравнению со стандартным (1) и крейсерская скорость (2) серебряного караса (Fry and Hart, 1946)

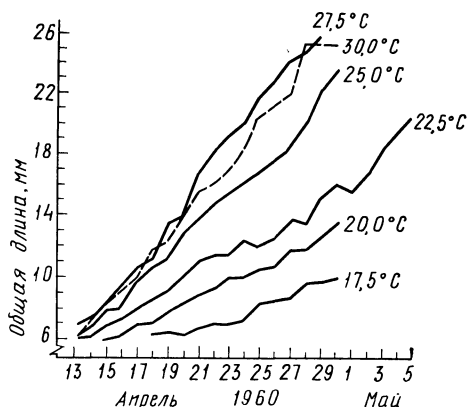


Рис. 3.26. Скорости роста молоди большеротого американского черного окуня при различных температурах (Strawn, 1961)

ного (активного) и стандартного потребления кислорода в зависимости от температуры. На рисунке 3.24 показаны кривые активного и стандартного потребления кислорода. Обе скорости возрастают при повышении температуры до определенной величины. При повышении температуры активное потребление кислорода снижается быстрее, чем при стандартном обмене. Из рис. 3.24 видно, что активное потребление кислорода серебряным карасем возрастает при повышении температуры до 28°C, а затем быстро снижается. Область температур выше 28°C для серебряного караса — область термального стресса (Fry and Hart, 1946). Фрай и Харт сопоставляли также зависимости максимальной крейсерской скорости и скорости потребления кислорода для серебряного караса от температуры (рис. 3.25). Кривые имеют почти одинаковую форму, что доказывает сопоставимость результатов, полученных различными косвенными методами, и применимость этих методов для определения момента наступления температурного стресса.

Оба описанных метода полезны для оценки условий внешней среды, так как измеряемые параметры влияют на выживаемость организма. Поскольку в искусственных промышленных системах основная доля затрат приходится на приобретение корма для рыб, показателем эффективности системы является эффективность утилизации пищи и (или) скорость роста рыб.

Простой метод сравнения эффективности, основанный только на определении изменения скорости роста в зависимости от времени и температуры, представлен на рис. 3.26. Повышение температуры до 27,5°C вызывает увеличение скорости роста молоди большеротого окуня. Этот метод можно использовать для естественных водоемов, в которых невозможно контролировать количество пищи и другие факторы, влияющие на рост рыб. Если же

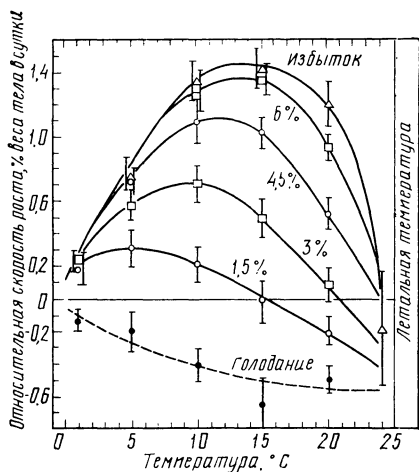


Рис. 3.27. Влияние рациона (в % массы тела в день) на зависимость скорости роста от температуры для нерки в возрасте от 7 до 12 мес (Brett et al., 1969)

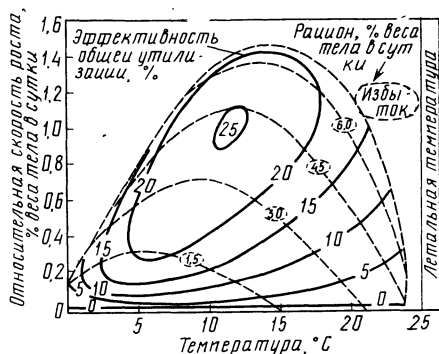


Рис. 3.28. Зависимость эффективности общей утилизации пищи от температуры и рациона (Brett et al., 1969)

корма приходится закупать, удобнее применять метод анализа, аналогичный разработанному Бреттом (Brett et al., 1969). На рис. 3.27 показано влияние температуры на скорость роста нерки при различных режимах питания. Оптимальный рост наблюдался при избыточном питании, причем при увеличении количества потребляемой пищи температура, обеспечивающая максимальный рост, повышалась, при высоких температурах рыбы голодали даже тогда, когда количество потребляемой пищи составляло 3 % веса тела в день. Когда скорость метаболизма является функцией температуры, нет ничего удивительного в том, что при высоких температурах рыбы голодают даже при наличии корма. Метаболические характеристики также позволяют объяснить повышение температуры, соответствующей максимальной скорости роста, при увеличении рациона.

При эксплуатации хозяйств аквакультуры интерес представляет не столько скорость роста, сколько получаемая прибыль. Рис. 3.28 получен наложением кривых эффективности на кривые скорости роста, приведенные на рис. 3.27. Кривые общей эффективности были рассчитаны по следующему уравнению:

$$E_g = (G/I) 100 \%, \quad (3.3)$$

где E_g — эффективность утилизации пищи; G — прирост; I — потребление пищи.

Эффективность утилизации пищи может изменяться от 0 до 25 %. Для получения максимальной прибыли при учете только затрат на корм нерку необходимо содержать в диапазоне температур 10—13°C и стремиться к приросту около 1 % веса.

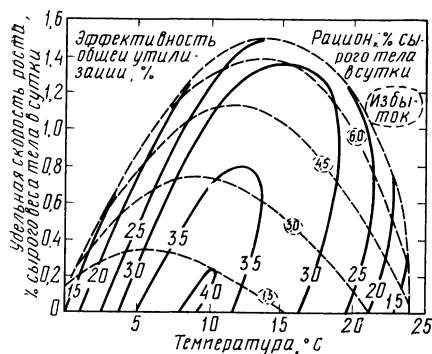


Рис. 3.29. Зависимость эффективности чистой утилизации пищи от температуры и рациона. Изоплеты эффективности наложены на кривые скорости роста с рис. 3.27 (Brett et al., 1969)

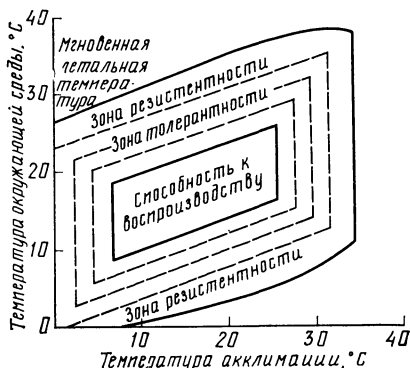


Рис. 3.30. Температурные зависимости для рыб

Эффективность общей утилизации не является важным параметром с рыбоводной точки зрения. Эффективность чистой утилизации позволяет точнее оценить вес рыбной продукции, полученной на единицу веса корма. Чистая утилизация определяется следующим образом:

$$\text{чистая утилизация пищи} = \text{общая утилизация пищи} - \text{затраты на обмен.} \quad (3.4)$$

На рис. 3.29 приведены зависимости скорости роста от температуры и рациона; на график нанесены также кривые чистой утилизации пищи. Такой график представляет больший интерес для рыбовода, чем график типа, показанного на рис. 3.28.

При искусственном разведении рыб кроме затрат на корма существуют и других расходы, которые необходимо учитывать при оценке эффективности системы. Существует несколько методов учета этих затрат, одним из которых является метод многомерного анализа, аналогичный проиллюстрированному рис. 3.28, но с включением всех затрат. Очевидно, что ввиду его многомерности полученное уравнение не может быть представлено на одном графике, однако для нахождения оптимального решения может быть проведена максимизация математических уравнений. Такой анализ желательно проводить всегда, но он требует большого количества экспериментальных данных. Даже данные, аналогичные приведенным на рис. 3.28, собраны только для некоторых видов рыб, таких как нерка и сомик. Однако и для этих видов данных недостаточно для проведения упомянутого выше многомерного анализа.

Полученные для рыб температурные зависимости представлены на рис. 3.30. Внешняя линия определяет максимальные значе-

ния температур, при которых может существовать рыба. Следующая линия (первая штриховая) показывает, при каких максимальных значениях температур рыба может существовать неограниченное время. Эта линия служит границей между зонами резистентности и толерантности. Внутри зоны толерантности существует несколько уровней термального стресса, когда существование рыбы возможно, хотя ее активность, скорость роста или эффективность утилизации пищи снижаются. Внутренний четырехугольник определяет термальные границы возможного воспроизводства, т. е. значения температур, не вызывающих или почти не вызывающих стресса организмов. Термальный стресс в областях, прилегающих к зоне воспроизводства, может быть выявлен далеко не всегда. К сожалению, ни для одного из видов не собрана информация, необходимая для полного построения диаграммы, приведенной на рис. 3.30; для большинства видов данные отсутствуют вообще или их недостаточно для построения основных элементов диаграммы.

REFERENCES

- Bennett, George W. (1962). *Management of Artificial Lakes and Ponds*. Reinhold, New York.
- Brahtz, John. (1968). *Ocean Engineering*. Wiley, New York.
- Brett, J. R. (1944). Some Lethal Temperature Relations of Algonquin Park Fishes. University of Toronto, Stud. Biology Series 52, Publication No. 63. Ontario Fisheries Research Laboratory, pp. 1—49.
- Brett J. R. (1952). Temperature Tolerance in Young Pacific Salmon, Genus *Oncorhynchus*. *Journal of the Fisheries Research Board of Canada* 9 (6): 265—323.
- Brett, J. R. (1956). Some Principles in the Thermal Requirements of Fishes. *Quarterly Review of Biology* 31 (2): 75—87.
- Brett, J. R. (1959). Thermal Requirements of Fish—Three Decades of Study, 1940—1970, in *Biological Problems in Water Pollution*, Transactions of the 1959 Seminar, C. M. Tarzwell, Ed. U. S. Public Health Service, Division of Water Supply and Pollution Control, Publication No. W60—3, 1960, pp. 110—117.
- Brett J. R., M. Hollands, and D. F. Alderdice (1958). The Effect of Temperature on the Cruising Speed of Young Sockeye and Coho Salmon. *Journal of the Fisheries Research Board of Canada* 15 (4): 587—605.
- Brett, J. R., J. E. Shelbourn, and C. T. Shoop (1969). Growth Rate and Body Composition of Fingerling Sockeye Salmon, *Oncorhynchus nerka*, in Relation to Temperature and Ration Size. *Journal of the Fisheries Research Board of Canada* 26: 2363—2394.
- Cocking, Anthony W. (1959). The Effects of High Temperatures on Roach (*Rutilus rutilus*). I. The Effects of Constant High Temperatures. *Journal of Experimental Biology* 36: 203—216.
- Devlin, Robert M. (1966). *Plant Physiology*, 2nd printing. Reinhold, New York.
- Dickie, L. M. (1958). Effects of High Temperature of Survival of the Giant Scallop. *Journal of the Fisheries Board of Canada* 15 (6): 1189—1211.
- Doudoroff, P. (1942). The Resistance and Acclimatization of Fishes to Temperature Changes. I. Experiments with *Girella nigricans* (Ayers). *Biological Bulletin*, Wood's Hole 83: 219—244.
- Encyclopedia of Oceanography, Rhodes W. Fairbridge, Ed. (1966). Downen, Hutchinson & Ross, Stroudsburg, Pa.
- Flohn H. (1966) Energy Budget of the Earth's Surface, in *Encyclopedia of Oceanography*, *Encyclopedia of Earth Science Series*, Vol. 1, Rhodes W. Fairbridge, Ed. Downen, Hutchinson & Ross, Stroudsburg, Pa., pp. 250—256.

- Fry, F. E. J., J. R. Brett, and G. H. Clawson (1942). Lethal Limits of Temperature for Young Goldfish. Review of Canadian Biology 1: 50—66.
- Fry, F. E. T. and J. S. Hart (1946). The Relation of Temperature to Oxygen Consumption in the Goldfish. Biological Bulletin 94 (1): 66—77.
- Fry, F. E. J., J. S. Hart, and K. F. Walker (1946). Lethal Temperature Relations for a Sample of Young Speckled Trout (*Salvelinus fontinalis*). University of Toronto, Stud. Biology Series 54, Publication No. 66. Ontario Fisheries Research Laboratory, pp. 1—35.
- Garside, E. T. (1966). Effects of Oxygen in Relation to Temperature on the Development of Embryos of Brook Trout and Rainbow Trout. Journal of the Fisheries Research Board of Canada 23 (8): 1121—1134.
- Garside E. T. and C. M. Jordan (1968). Upper Lethal Temperature at Various Levels of Salinity in the Euryhaline Cyprinodontids. *Fundulus heteroclitus* and *Fundulus diaphanus*. Journal of the Fisheries Research Board of Canada 25 (12): 2716—2720.
- Hart, J. S. (1947). Lethal Temperature Relations of Certain Fish of the Toronto Region. Transactions of the Royal Society of Canada 41: 57—71.
- Hart, J. S. (1952). Geographic Variations of Some Physiological and Morphological Characters in Certain Freshwater Fish. University of Toronto Stud. Biology Series 60, Publication No. 72, Ontario Fisheries Research Laboratory, pp. 1—79.
- Hutchinson, G. Evelyn (1957). A Treatise on Limnology, Vol. 1. Geography, Physics, and Chemistry, Wiley, New York.
- Issacs, John D. (1969). The Nature of Oceanic Life. Scientific American 221 (3): 146—162.
- Jerlov, N. G. (1951). Optical Studies of Ocean Waters. Report of the Swedish Deep—Sea Expedition, 1947—1948, Vol. III, pp. 1—59.
- Jones, J. R. Erichsen (1964). Fish and River Pollution. Butterworths, London.
- Jordan, C. D. and E. T. Garside (1972). Upper Lethal Temperatures of Threespine Stickleback, *Gasterosteus aculeatus* (L.) in Relation to Thermal and Osmotic Acclimation. Ambient Salinity and Size. Canadian Journal of Zoology 50: 1405—1411.
- Kennedy, V. S. and J. A. Mihursky (1971). Upper Temperature Tolerances of Some Estuarine Bivalves. Chesapeake Science 12 (3): 193—204.
- Möller, F. (1957). Strahlung in der unteren Atmosphäre, in Encyclopedia of Physics, S. Flügge Ed. Vol. 48, pp. 155—253. Berlin.
- Raney, Edward C., Bruce W. Menzel, and Emily C. Weller (1973). Heated Effluents, and Effects on Aquatic Life with Emphasis in Fishes: A Bibliography. Ichthyological Associates Bulletin No. 9 (Also P. S. Atomic Energy Commission publication TID—3918).
- Ray, Peter Martin (1966). The Living Plant. Holt, Rinehart & Winston, New York.
- Reid, George K. (1961). Ecology of Inland Waters and Estuaries. Reinhold, New York.
- Ryther, John H. (1959). Potential Productivity of the Sea. Science 130: 602—608. American Association for the Advancement of Science, Washington, D. C.
- Sorokin, Constantine and Robert W. Krauss (1962). Effects of Temperature and Illuminance on *Chlorella* Growth Uncoupled from Cell Division. Plant Physiology 37 (1): 37—42.
- Steeman Nielsen, E. and Vagn K. R. Hansen (1959). Light Adaptation in Marine Phytoplankton Populations and Interrelation with Temperature. Physiologia Plantarum 12: 353—370.
- Strawn, Kirk (1961). Growth of Largemouth Bass Fry at Various Temperatures. Transactions of the American Fisheries Society 90 (3): 334—335.
- Waugh, D. L. and E. T. Garside (1971). Upper Lethal Temperatures in Relation to Osmotic Stress in the Ribbed Mussel, *Modiolus demissus*. Journal of the Fisheries Research Board of Canada 28: 527—532.
- Williams, Jerone (1962). Oceanography: An Introduction to Marine Science. Little, Brown, Boston.

Глава 4. КИСЛОРОД

Для жизнедеятельности почти всех водных организмов, за исключением некоторых бактерий, необходим кислород. Большинству этих организмов приходится извлекать его из воды, поэтому извлечение кислорода из воды и внесение его в воду — процессы жизненно важные для водных организмов. В хозяйствах аквакультуры важнейшей задачей является обеспечение насыщения воды необходимым количеством кислорода. Это особенно важно для систем с большой биологической нагрузкой.

Основными источниками кислорода для воды являются фотосинтезирующие растения и атмосфера. В атмосфере содержится около 21 % кислорода. В холодной воде, находящейся в контакте с воздухом атмосферы, в состоянии насыщения растворено не более 15 мг/л кислорода, т. е. массовая доля кислорода составляет примерно 0,0015. Столь малые концентрации затрудняют извлечение кислорода водными организмами и требуют строгого контроля за содержанием кислорода в воде.

Содержание кислорода в воде, насыщенной воздухом, зависит от температуры и солёности (хлорности). При постоянной температуре концентрация насыщения воды кислородом линейно связана с хлорностью. Однако с увеличением температуры наклон кривой уменьшается (рис. 4.1). Зависимость концентрации насыщения от температуры при постоянной хлорности, если ее изобразить на полулогарифмической координатной бумаге, выглядит почти линейно.

В табл. 4.1 показано, как концентрация насыщения воды кислородом зависит от температуры и солёности. Из таблицы видно, что в холодной воде может содержаться больше кислорода, чем в теплой, а в пресной больше, чем в соленой. Иными словами, увеличение как солёности, так и температуры приводит к уменьшению содержания кислорода в воде при 100 %-ном насыщении.

Скорость переноса кислорода из воздушной среды в водную зависит от температуры, солёности и степени насыщения воды, а также от турбулентности поверхности раздела вода — воздух.

Температура воды, солёность, степень насыщения — все эти факторы влияют на градиент концентрации, являющийся движущей силой процесса переноса кислорода. Турбулентность раздела вода — воздух значительно увеличивает площадь контакта двух сред: чем больше площадь поверхности раздела, тем больше скорость переноса кислорода. Перенос кислорода в воде почти целиком обусловлен циркуляци-

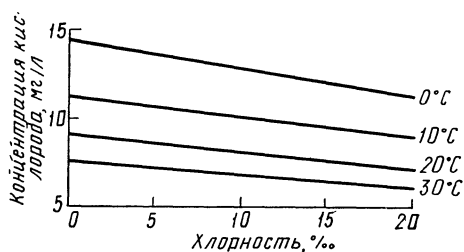


Рис. 4.1. Концентрация равновесного насыщения кислорода в воде, находящейся в контакте с воздухом, при различных температуре и солёности (Standard Methods, 1971)

Таблица 4.1. Растворимость кислорода в воде, находящейся в контакте с насыщенными водяными парами воздухом при давлении 760 мм рт. ст.

(Standard Methods for the Examination of Water and Waste Water, 1971. American Public Health Association.)

Температура, °C	Содержание растворенного кислорода в воде (в мг/л) при концентрации хлоридов в воде, мг/л					Разность в содержании кислорода на 100 мг хлоридов	Температура, °C	Содержание растворенного кислорода в воде (в мг/л) при концентрации хлоридов в воде, мг/л					Разность в содержании кислорода на 100 мг хлоридов
	0	5000	10000	15000	20000			0	5000	10000	15000	20000	
0	14,6	13,8	13,0	12,1	11,3	0,017	26	8,2	7,8	7,4	7,0	6,6	0,008
1	14,2	13,4	12,6	11,8	11,0	0,016	27	8,1	7,7	7,3	6,9	6,5	0,008
2	13,8	13,1	12,3	11,5	10,8	0,015	28	7,9	7,5	7,1	6,8	6,4	0,008
3	13,5	12,7	12,0	11,2	10,5	0,015	29	7,8	7,4	7,0	6,6	6,3	0,008
4	13,1	12,4	11,7	11,0	10,3	0,014	30	7,6	7,3	6,9	6,5	6,1	0,008
5	12,8	12,1	11,4	10,7	10,0	0,014	31	7,5					
6	12,5	11,8	11,1	10,5	9,8	0,014	32	7,4					
7	12,2	11,5	10,9	10,2	9,6	0,013	33	7,3					
8	11,9	11,2	10,6	10,0	9,4	0,013	34	7,2					
9	11,6	11,0	10,4	9,8	9,2	0,012	35	7,1					
10	11,3	10,7	10,1	9,6	9,0	0,012	36	7,0					
11	11,1	10,5	9,9	9,4	8,8	0,011	37	6,9					
12	10,8	10,3	9,7	9,2	8,6	0,011	38	6,8					
13	10,6	10,1	9,5	9,0	8,5	0,011	39	6,7					
14	10,4	9,9	9,3	8,8	8,3	0,010	40	6,6					
15	10,2	9,7	9,1	8,6	8,1	0,010	41	6,5					
16	10,0	9,5	9,0	8,5	8,0	0,010	42	6,4					
17	9,7	9,3	8,8	8,3	7,8	0,010	43	6,3					
18	9,5	9,1	8,6	8,2	7,7	0,009	44	6,2					
19	9,4	8,9	8,5	8,0	7,6	0,009	45	6,1					
20	9,2	8,7	8,3	7,9	7,4	0,009	46	6,0					
21	9,0	8,6	8,1	7,7	7,3	0,009	47	5,9					
22	8,8	8,4	8,0	7,6	7,1	0,008	48	5,8					
23	8,7	8,3	7,9	7,4	7,0	0,008	49	5,7					
24	8,5	8,1	7,7	7,3	6,9	0,008	50	5,6					
25	8,4	8,0	7,6	7,2	6,7	0,008							

ей, течениями и турбулентностью. Диффузия кислорода столь мала, что не имеет практического значения. Например, для увеличения концентрации кислорода на глубине 10 м от 0 до 0,4 мг/л диффузией потребовалось бы около 600 лет (Reid, 1961).

Градиент концентрации оказывает большое влияние на скорость переноса кислорода через поверхность раздела вода—воздух. Поскольку содержание кислорода в атмосфере может лишь незначительно отклоняться от 21 %, скорость переноса определяется отношением данной концентрации кислорода в воде к концентрации насыщения. Математически градиент концентрации можно записать в виде

$$\Delta C_t = C_s - C_t, \quad (4.1)$$

где C_s — концентрация кислорода при 100 %-ном насыщении; C_t — концентрация кислорода в момент времени t ; ΔC_t — градиент концентрации в момент времени t .

Скорость переноса кислорода с увеличением градиента концентрации возрастает, поэтому по мере приближения содержания кислорода в воде к 100 %-ному насыщению скорость переноса уменьшается.

Именно поэтому значительно труднее полностью насытить воду кислородом, чем повысить концентрацию на 1—2 мг/л.

Математически перенос кислорода можно описать следующим уравнением:

$$\Delta C/\Delta t = KA(C_s - C_t), \quad (4.2)$$

где $\Delta C/\Delta t$ — изменение концентрации за время Δt ; K — константа, учитывающая влияние турбулентности и зависящая от условий; A — площадь поверхности контакта вода—воздух; C_s и C_t — те же, что и в уравнении (4.1).

Уравнение (4.2) чаще встречается в дифференциальной форме

$$dC/dt = KA(C_s - C_t). \quad (4.3)$$

Это уравнение показывает, что скорость изменения концентрации dC/dt равна произведению константы K , учитывающей влияние турбулентности поверхности раздела вода—воздух, на площадь поверхности контакта и градиент концентрации $C_s - C_t$.

Фотосинтез — второй основной источник кислорода для водных систем. Кислород является побочным продуктом фотосинтеза и выделяется в воду фотосинтезирующими растениями. Однако фотосинтез и продуцирование кислорода могут происходить только при наличии света. Те водоросли, которые в дневное время выделяют кислород, ночью потребляют его. В солнечные дни количество кислорода, выделяемого фотосинтезирующими растениями, может быть достаточно для пересыщения поверхностных вод кислородом. В этом случае он выделяется в атмосферу. Фотосинтетическая продукция кислорода несколько отстает от суточного хода получаемой Землей солнечной энергии, поэтому содержание кислорода в естественных водоемах и прудах минимально на рассвете. Максимальные концентрации обычно наблюдаются в середине дня или несколько позднее. Таким образом, определение концентрации кислорода для выявления возможного его дефицита следует проводить на рассвете.

ПРЕСНОВОДНЫЕ СИСТЕМЫ

Озера и пруды. Для водоемов, глубина которых превышает толщину слоя фотосинтеза, характерны некоторые особенности распределения кислорода. В верхнем слое воды продуцирование кислорода в результате фотосинтетической активности, осредненное за сутки, превышает его потребление. В нижележащих слоях кислорода производится меньше, чем потребляется. На некоторой глубине количество продуцируемого кислорода равно количеству

потребляемого. Эта глубина называется глубиной компенсации. Ниже этой точки потребности кислорода на дыхание превышают его продуцирование, так как фотосинтез ограничен количеством проникающей сюда световой энергии. Кроме того, сюда же опускается отмерший планктон из вышележащих слоев. По мере погружения частицы планктона облепляются бактериями, которые извлекают из них органические компоненты. Кислород требуется для дыхания бактерий и других обитателей этих глубин.

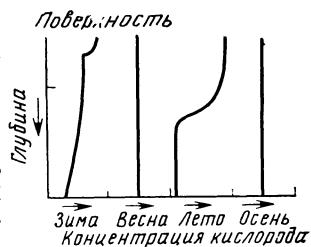


Рис. 4.2. Концентрация кислорода в эвтрофном димиктическом озере

Вертикальное распределение кислорода в озерах и прудах зависит от циркуляции и потенциальной продукции вод. На рис. 4.2 представлено типичное вертикальное распределение кислорода в эвтрофном высокопродуктивном озере. Зимой при наличии ледового покрова содержание кислорода незначительно убывает с глубиной и со временем медленно уменьшается во всей толще вод. Непосредственно у поверхности концентрация может быть несколько выше, что обусловлено фотосинтетической активностью. Однако фотосинтез лимитируется количеством света, проникающего сквозь толщу льда, а также низкой температурой воды. С наступлением весны и таянием льда начинается обмен кислородом между водной средой и атмосферой. Одновременно начинается весеннее перемешивание вод. Исчезновение ледового покрова и перемешивание приводят к тому, что содержание кислорода становится довольно высоким и одинаковым по всей глубине. С приближением лета происходит стратификация водной толщи. Воды, находящиеся над термоклином, перемешанные и прогретые, благодаря активному фотосинтезу и обмену с атмосферой характеризуются высоким содержанием кислорода. Поверхностные воды могут даже в течение дня достигать насыщения. Воды термоклина и нижележащие не контактируют с атмосферой из-за температурной стратификации. Сюда в значительном количестве поступают органические остатки погибших в вышележащих продуктивных слоях организмов. Температура этих вод несколько выше, чем зимой. Это способствует интенсификации метаболизма бактерий. Процессы разложения и дыхания приводят к быстрому использованию получаемого кислорода.

Часто к концу лета воды ниже термоклина становятся анаэробными. В анаэробных условиях возможно накопление метана и сероводорода. Эти газы с характерным неприятным запахом токсичны для обитателей водоемов. С наступлением осени поверхностные воды охлаждаются, термоклин разрушается — начинается осеннее перемешивание. Концентрация кислорода выравнивается по всей глубине, а излишки углекислоты, сероводорода и метана высвобождаются в атмосферу.

Область быстрого снижения концентрации кислорода, называ-

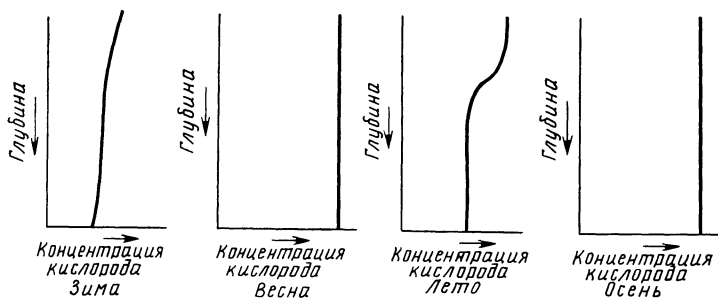


Рис. 4.3. Вертикальное распределение кислорода в олиготрофном озере в разное время года

емая клиноградом *, обычно располагается вблизи от термоклина, так как вышележащие воды перемешиваются и хорошо вентилируются. Однако термоклин и скачок кислорода не всегда полностью совпадают по глубине. В эвтрофных водах клиноград обычно расположен на глубине термоклина или несколько выше, так как высокая продуктивность (большое число клеток фитопланктона) вызывает быстрое ослабление света. В олиготрофных, низкопродуктивных водах клиноград менее выражен и может вообще отсутствовать.

Олиготрофные низкопродуктивные воды относительно чисты и прозрачны. На рис. 4.3 показано распределение кислорода по сезонам в олиготрофном димиктическом озере. Кривые вертикального распределения очень сходны с кривыми для эвтрофного озера. Различия заключаются в том, что зимой, когда процессы дыхания и разложения органических веществ замедлены, концентрация кислорода в олиготрофном озере несколько выше, чем в эвтрофном. Весной и осенью распределение кислорода в олиготрофном озере такое же, как в эвтрофном. Наиболее значительные различия в распределении кислорода между этими двумя типами водоемов наблюдаются летом. В олиготрофном озере слой компенсации располагается на большей глубине в связи с меньшей продуктивностью и соответственно меньшим экранирующим эффектом планктона. Пониженная продуктивность требует также меньше кислорода на дыхание и разложение органических веществ. В результате летом наблюдается высокая концентрация кислорода выше клинограда (правда, несколько ниже, чем в эвтрофном озере), сравнительно слабо выраженный клиноград и медленное снижение в нижележащих слоях. В олиготрофных озерах анаэробные условия развиваются редко, даже к концу лета в глубинных водах.

Эвтрофные и олиготрофные воды были описаны в качестве экстремальных примеров. Кроме них существуют озера и пруды с

* В отечественной литературе этот слой называется слоем скачка кислорода.—
Прим. ред.

промежуточными характеристиками. Рыбоводные пруды часто недостаточно глубоки для развития выраженного термоклина, но могут иметь довольно резко выраженный клиноград. Причиной его образования может быть избыточное кормление. При правильной биотехнике в прудах не должен образовываться заметный клиноград. При устройстве коллекторов, садков и других приспособлений для выращивания водных организмов необходимо исключать возможность обитания культивируемых объектов под слоем скачка кислорода. Это оборудование нельзя также размещать в местах, где возможно значительное выделение сероводорода под клиноградом, даже если оно установлено над ним, так как проходящие сквозь столб воды пузырьки сероводорода могут оказаться губительными для культивируемых объектов. Кроме того, следует избегать размещения водозаборных устройств под клиноградом, если не обеспечена достаточная аэрация. Хотя аэрация обходится довольно дорого, в некоторых районах, возможно, целесообразно для получения охлажденной воды откачивать ее из-под клинограда.

Проточные воды. Проточные воды насыщаются кислородом в результате фотосинтетической активности и контакта с воздухом атмосферы. Однако фотосинтез не имеет здесь такого значения, как в озерах и прудах, поскольку в проточной воде рост фитопланктона затруднен. Чем больше скорость и турбулентность потока, тем меньшую роль играет фотосинтез как источник кислорода. Прикрепленные водоросли могут продуцировать значительное количество кислорода, особенно в реках и ручьях с медленным течением.

Содержание кислорода в проточных водных системах (реках, ручьях, рыбоводных каналах) зависит от скорости течения, расхода системы, мутности (в частности, обусловленной неживым веществом) и температуры воды, поперечного сечения ручья или канала и количества получаемой солнечной энергии. Влияние этих факторов проявляется косвенно: они определяют скорость фотосинтеза, дыхание, разложение органического вещества и интенсивность физической аэрации, т. е. содержание кислорода в системе. Относительное значение каждого из них определить довольно трудно, поскольку они в значительной степени различаются для разных систем и изменяются для каждой системы во времени и пространстве.

Годовой цикл кислорода в реках и ручьях тесно коррелирует с температурой. В большинстве рек содержание кислорода достигает максимума зимой, а минимума — летом. Однако эта основная зависимость может нарушаться несколькими факторами. Ледовый покров подавляет фотосинтез и уменьшает зимний максимум кислорода. Весеннее уменьшение концентрации кислорода может быть связано с выносом подводной растительности во время половодья. Минимум растворенного кислорода в конце лета часто обусловлен высокой температурой воды, уменьшением перемешивания и расхода или интенсивным разложением продуцированного

за лето органического вещества. При достаточном содержании питательных веществ возможно быстрое размножение фитопланктона («цветение»). В это время содержание кислорода днем может резко увеличиваться.

Суточный цикл кислорода в ручьях в основном определяется флуктуациями температуры и соотношением процессов фотосинтеза и дыхания. В быстрых чистых ручьях с ограниченным количеством растительности концентрация кислорода благодаря турбулентности поддерживается на уровне 100 %-ного насыщения или около него. Фотосинтетическая продукция кислорода за светлое время суток часто превышает диффузию его в атмосферу и потребление на дыхание, вместе взятые. В результате днем происходит перенасыщение воды кислородом, а ночью концентрация его снижается до 100 %-ного насыщения. Зимой максимумы суточной продукции кислорода и температуры наблюдаются примерно в одно время. Летом увеличение продукции кислорода часто отстает от роста температуры на 2—3 ч. Это приводит к тому, что содержание кислорода остается высоким даже после наступления темноты. Минимум кислорода в ручьях этого типа наблюдается перед понижением температуры ранним утром, но точное его время зависит в определенной степени от потребления кислорода. Большое влияние на концентрацию кислорода в ручьях этого типа оказывает интенсивность солнечной радиации.

Распределение кислорода по течению реки зависит от многих факторов. В верхнем течении концентрация кислорода в основном определяется температурой и турбулентностью потока. Ниже по течению, где река замедляет свой ход и появляется обильная растительность, содержание кислорода обусловлено главным образом процессами фотосинтеза и дыхания. Максимум кислорода наблюдается здесь в полдень, а минимум — ранним утром. В нижнем течении с возрастанием мутности и интенсификацией процессов разложения органического вещества концентрация кислорода уменьшается. Поступление загрязняющих веществ, а также подъем уровня вод в болотах и маршах приводят к уменьшению содержания кислорода в месте впадения рек и ниже по течению.

Содержание кислорода в той части реки, которая расположена ниже дамб и водохранилищ, зависит от того, с какого уровня водохранилища производится забор воды. Воды, забираемые из гипolimниона при развитой летней стратификации, бедны кислородом и могут оказать большое влияние на все компоненты экосистемы ниже по течению. Если вода забирается из верхнего слоя водохранилища, богатого кислородом, это может способствовать повышению содержания кислорода в нижнем течении реки.

МОРСКИЕ СИСТЕМЫ

Концентрация кислорода в естественных морских системах (океанах, морях) может изменяться от нуля, например в некоторых анаэробных областях, таких, как глубинные воды Черного

моря, до равновесного насыщения и даже перенасыщения в водах, омывающих коралловые рифы*. Поскольку соленость океанских вод составляет приблизительно 35 ‰, концентрация равновесного насыщения в океанах ниже, чем в пресноводных водоемах. Для поверхностных тропических вод эта концентрация составляет 6—7 мг/л, а для полярных может превышать 11 мг/л. Концентрация глубинных океанских вод, хотя они и не насыщены кислородом, часто превышает 7 мг/л (Raymont, 1963).

Хотя концентрация кислорода в различных океанах и даже в разных районах одного океана колеблется, можно обнаружить определенные закономерности в вертикальном распределении. На рис. 4.4 показана типичная кривая вертикального распределения кислорода для вод субтропической зоны океанов.

Концентрация кислорода в поверхностном слое в этих районах довольно высока. Поступление кислорода из атмосферы и в процессе фотосинтеза поддерживает концентрацию на уровне, близком к равновесному насыщению (5—7 мг/л). Ниже глубины слоя фотосинтеза концентрация резко убывает, образуя область, известную как «зона кислородного минимума». Глубина ее колеблется от 150 м в некоторых морях до 1000 м в океанах. Концентрация кислорода в этой зоне может быть ниже 1,4 мг/л. Наиболее низких значений (0,14 мг/л) она достигает в зоне кислородного минимума у берегов Южной и Центральной Америки в Тихом океане. Концентрация кислорода в зоне кислородного минимума в Атлантическом океане, по-видимому, в среднем несколько выше, чем в Тихом. Это различие может быть объяснено смещением больших количеств подповерхностных вод с Тихоокеанскими промежуточными водами, что приводит к образованию верхнего минимума кислорода с очень низкими концентрациями в юго-восточной части Тихого океана.**

Ниже зоны кислородного минимума с увеличением глубины концентрация кислорода возрастает и в глубинных водах достигает довольно высоких значений (Raymont, 1963).

Образование зоны кислородного минимума, по-видимому, обусловлено несколькими причинами. В областях минимальных кон-

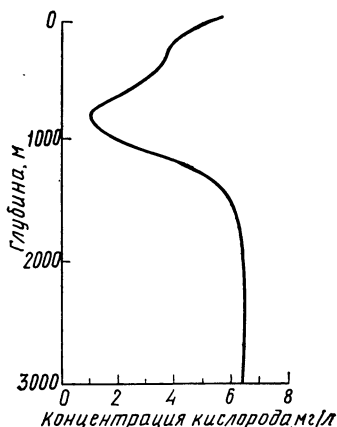


Рис. 4.4. Вертикальное распределение кислорода в субтропических водах (Meteorological Expedition, 1925—1927)

* С этим утверждением автора трудно согласиться, поскольку колония кораллов не выделяет, а поглощает кислород. В некоторых случаях в воде, прошедшей через коралловый риф, содержится всего 60—70 % кислорода. — *Прим. ред.*

** Не являясь специалистом в области химической океанографии, автор ошибочно трактует известный факт о большей аэрируемости промежуточных вод Атлантики в результате меньшей плотностной стратификации. — *Прим. ред.*

центратий скорости течений, вероятно, достигают минимальных значений. Поскольку термоклин располагается на этой же глубине, происходит быстрое увеличение плотности и вязкости воды. В результате скорость опускания детрита уменьшается, что приводит к увеличению концентрации разлагающегося органического вещества. Для его окисления требуется значительное количество кислорода. На глубинах, где прослеживается зона кислородного минимума, обнаруживаются большие скопления зоопланктона, потребляющего кислород в процессе метаболизма. Совместное действие всех перечисленных выше факторов приводит к уменьшению концентрации растворенного кислорода в воде на данных горизонтах.

Хотя описанное выше вертикальное распределение дает представление о характере изменения концентрации кислорода с глубиной, кривые вертикального распределения в некоторых районах океана отличаются от типичных. В полярных областях, где происходит погружение поверхностных вод, содержание кислорода остается почти постоянным во всей толще. В таких районах подъема вод, как, например, у западных берегов Северной и Южной Америки концентрация кислорода на поверхности или вблизи нее значительно ниже концентрации равновесного насыщения. Поверхностные слои в высокопродуктивных районах, например к востоку от Гренландии или около некоторых коралловых рифов, в периоды интенсивной фотосинтетической деятельности могут быть перенасыщены кислородом.

СОЛОНОВАТОВОДНЫЕ СИСТЕМЫ

Концентрация кислорода в эстуариях колеблется в широком диапазоне и зависит от многих факторов. Поскольку степень насыщения кислородом уменьшается с увеличением температуры и солености, градиент кислорода часто расположен вдоль эстуария с максимальными концентрациями в верхней по течению части эстуария. В периоды большого речного расхода и притока пресной воды концентрация кислорода в эстуарии увеличивается. В сухое время года с повышением солености эстуарных вод следует ожидать снижения концентрации растворенного кислорода.

Концентрация кислорода в водах эстуария может определяться стратификацией, глубиной, наличием растительности, приливами, временем года и даже дня. При плотностной стратификации в эстуарии может существовать значительная разница в концентрации кислорода между поверхностными и глубинными водами. Например, в Чесапикском заливе концентрация кислорода летом в поверхностных водах составляет 90—100 % равновесного насыщения, в то время как в придонных — 40—50 % (Raymont, 1963). Это свидетельствует о продуцировании кислорода в процессе фотосинтеза в верхних слоях и об утилизации его при разложении органических веществ или о присутствии бедных кислородом морских вод в нижних слоях.

Суточные и сезонные колебания концентрации кислорода в эстуариях зависят от происхождения пресноводного источника, морфологии бассейна и влияния приливов. В глубоких эстуариях фотосинтетическая активность придонной флоры ограничена, в результате чего суточный ход кислорода выражен довольно слабо. В менее глубоких эстуариях суточные колебания концентрации проявляются ярче. Приливные перемещения воды маскируют суточные колебания и в значительной мере затрудняют их изучение.

Сезонные колебания концентрации кислорода зависят от изменений расхода, приливов, продолжительности дня и биологических процессов. Приток морской воды во время прилива изменяет концентрацию кислорода в эстуарии. Продолжительность дня в значительной степени определяет температуру воды, кроме того, с ней связано функционирование биологических организмов и фотосинтетическая деятельность. Сезонные колебания содержания кислорода хорошо просматриваются на примере Чесапикского залива. В апреле на поверхности содержание кислорода составило 143 % равновесного насыщения, а в августе — 42 %. В придонных водах концентрация кислорода достигала 133 % в октябре и 24 % в июне (Reid, 1961).

ЗНАЧЕНИЕ КИСЛОРОДА В ЖИЗНИ ВОДНЫХ ОРГАНИЗМОВ

Кислород часто является лимитирующим фактором в водных системах. Источники первичной продукции (фотосинтезирующие растения) при свете продуцируют кислород, но в темноте потребляют его. Таким образом, кислород может лимитировать как первичную, так и вторичную продукцию. Весьма высокое содержание кислорода в атмосфере (около 21 %) может замедлять фотосинтез некоторых растений суши. Это явление невозможно в водной среде, так как концентрация кислорода здесь слишком мала. Истощение запасов кислорода в темное время суток может косвенно влиять на фотосинтез, поскольку популяция фотосинтезирующих водорослей сокращается.

Водные организмы исключительно хорошо приспособились к низкому содержанию кислорода и извлекают его из воды даже при очень низких концентрациях. Величина лимитирующей концентрации для любой рыбы зависит от ее генетического строения температуры воды, уровня активности, а также испытываемого стресса. Обычно рыбы не способны существовать при концентрации менее 3 мг/л, хотя некоторые моллюски и другие организмы могут ограниченное время существовать в воде при столь низком содержании кислорода. При концентрации кислорода 3—5 мг/л некоторые виды рыб могут жить неограниченное время, а другие — только в течение короткого периода. При концентрации свыше 5 мг/л все водные организмы могут существовать неограниченное время (в пределах естественного жизненного цикла), если другие параметры окружающей среды благоприятны.

Как правило, низкие концентрации кислорода легче перено-

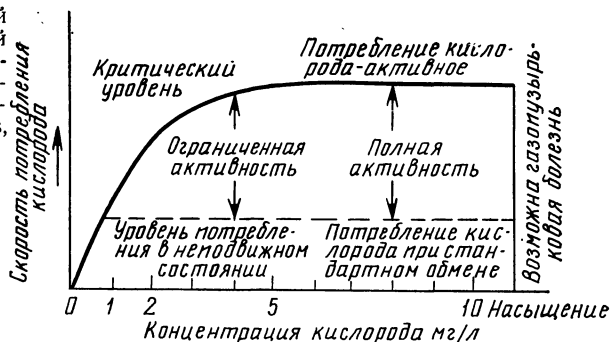
сятся взрослыми особями видов, стоящих на нижней ступени эволюционной лестницы (например, крабы и устрицы). Молодь почти всех видов менее устойчива к низким концентрациям, чем взрослые. Однако делать широкое обобщение относительно влияния генетического строения и возраста на толерантность к низким концентрациям кислорода трудно из-за значительного разнообразия видов и существующих между ними различий. Потребности в кислороде многих распространенных водных организмов в настоящее время еще неизвестны.

Огромное влияние на потребности в кислороде всех водных организмов оказывает температура воды. За исключением млекопитающих, большинство водных организмов пойкилотермны, т. е. температура их тела равна температуре окружающей среды. Существует, однако, группа водных организмов, собственная температура которых на несколько градусов выше окружающей. Многие быстроплавающие рыбы, которые постоянно находятся в движении, обладают этой способностью (например, тунцы). При понижении температуры воды происходит соответствующее снижение температуры тела. Метаболическая активность, в сущности, представляет собой цепь ферментативных реакций. При понижении температуры скорость этих реакций уменьшается. Таким образом, интенсивность обмена веществ и активность рыб уменьшаются с понижением температуры, при этом соответственно уменьшается и их потребность в кислороде.

Как уже отмечалось в главе 3, существуют оптимальная и максимальная температуры жизнедеятельности рыб. При оптимальной температуре потребление кислорода высоко в связи с быстрым ростом и значительной активностью. Однако при температуре выше оптимальной организм испытывает стресс, который мобилизует сигнальную и защитную системы организма, что приводит к очень высокому потреблению кислорода. Дальнейшее повышение температуры усугубляет стресс и потребность в кислороде начинает обгонять рост температуры. При испуге и в других стрессовых ситуациях происходит аналогичное увеличение потребности организма в кислороде независимо от температуры. Стресс является одной из причин того, что рыба часто задыхается при вылове.

На потребление кислорода влияет также уровень активности (рис. 4.5). Скорость потребления кислорода непосредственно зависит от его концентрации в воде. Если концентрация столь низка, что организм не может извлечь достаточного для удовлетворения основных метаболических потребностей количества кислорода, наступает гибель. В некотором диапазоне концентраций выше той, при которой уже удовлетворяются основные метаболические потребности, организм может выжить, но не проявлять достаточной активности. При этом он более уязвим для хищников, подвержен заболеваниям и влиянию различных негативных факторов. Поскольку в этой области концентраций рыба находится в стрессовом состоянии, потребности в кислороде возрастают, что еще

Рис. 4.5. Гипотетический график, иллюстрирующий зависимость интенсивности потребления кислорода рыбой от его концентрации в воде (Jones, 1964)



больше осложняет ее существование. Организмы, способные совершать значительные перемещения, например пелагические рыбы, стремятся по возможности избегать районов, где концентрация кислорода ограничивает их активность. Обычно при недостатке кислорода в поведении рыбы появляется пассивность, она поднимается к поверхности, чтобы глотнуть воздуха. Если персонал, обслуживающий рыбоводные пруды, особенно с плотной посадкой, не обратит внимания на эти особенности поведения рыб, то в течение нескольких минут или часов может произойти катастрофический замор.

Выше той концентрации, при которой активность организма ограничена, расположена область концентраций, обеспечивающих полную, неограниченную активность. Нижней границей этой области является критический уровень, показанный на рис. 4.5, а верхней — концентрация равновесного насыщения. Для водных организмов необходимо поддерживать концентрацию кислорода в этом диапазоне. При перенасыщении воды кислородом существует значительный риск развития так называемой газопузырьковой болезни. Она вызывается перенасыщением крови рыб и моллюсков газом, который затем выделяется в виде пузырьков в тканях животного. Накопление большого количества этих пузырьков может привести к гибели. Чаще всего газопузырьковая болезнь вызывается азотом, но кислород также может быть ее причиной.

Необходимо отметить, что критический и летальный уровни, показанные на рис. 4.5, для различных биологических видов могут смещаться как влево, так и вправо. Верхняя граница — уровень равновесного насыщения — определяется исключительно физическими факторами: температурой и соленостью воды. С увеличением температуры воды скорость роста водных организмов возрастает до определенного предела. Температура, обеспечивающая максимальную скорость роста, различна для разных видов (см. главу 3). С увеличением температуры у всех водных организмов, по крайней мере пойкилотермных, потребление кислорода возрастает. Следовательно, повышается и критический уровень концентрации кислорода (см. рис. 4.5). В то же время увеличение темпе-

ратуры приводит к уменьшению концентрации равновесного насыщения. В результате диапазон концентрации кислорода, при котором возможна полная активность, сужается. Это означает, что в системах для культивирования повышение температуры воды вплоть до предельной позволяет ускорять рост культивируемых

Т а б л и ц а 4.2. Критические уровни кислорода
Jones, Fish and River Pollution, Butterworths, London, 1964)*

Рыба	Концентрация кислорода, мг/л	Температура, °C
Серебряный карась	2,5	20
Златоглазка	9,0	10
»	11,0	15
Окунь	7,0	20
Голец	6—7	5
»	6—7	10
»	9,0	20
Озерная форель (1 год)	Около $\frac{2}{3}$ равновесного насыщения	9,5—18
» » (2 года)	Около $\frac{3}{4}$ равновесного насыщения	9,5—18

* В таблице приведены концентрации, ниже которых активность перечисленных рыб становится ограниченной.

Т а б л и ц а 4.3. Лимитирующие концентрации кислорода для рыб при низкой температуре (0—4°C) воды
(Jones, Fish and River Pollution. Butterworths, London, 1964)*

Рыба	Концентрация кислорода, мг/л	Рыба	Концентрация кислорода, мг/л
Нотропис (Notropis heterodon)	Менее 0,2	Большеротый американский черный окунь	2,3
Нотропис (Notropis heterolepis)	Менее 0,2	То же	2,3—4,8**
Сомик	0,3—1,1**	Ушастый окунь (Lepomis bumilis)	1,4—4,2**
Ушастый окунь (Lepomis macrochirus)	0,2—0,4	Щука	2,3
То же	0,6	»	0,3—0,4
Американский сомик-кошка	0,2—0,3	»	2,3—3,2**
То же	0,3	Солнечная рыба	0,9—1,4**
Карп	0,8—1,0	То же	0,3—0,4
Эрмизон	0,3—0,4	Ушастый окунь (Ambloplites rupestris)	2,3—3,2**
Краппи	1,4—1,5**	Белый окунь	0,2—0,4
Нотемигонус	0,2—0,3	Чукучан	2,0
Ушастый окунь (Lepomis cyamillus)	1,5—3,6**	Желтый окунь	0,3—0,4
Айовский дартер	Более 0,2	То же	1,5—4,8**

* Данные базируются в основном на результатах полевых наблюдений в замерзших озерах и реках.

** Данные основаны на экспериментах в рыбных садках.

объектов, но одновременно уменьшает полезный диапазон концентраций кислорода. При этом повышаются требования к контролю концентрации кислорода, особенно в системах с высокой плотностью посадки.

В табл. 4.2 приведены критические концентрации кислорода для нескольких видов рыб при разной температуре. В табл. 4.3—4.5 представлены минимальные концентрации, переносимые раз-

Т а б л и ц а 4.4. Лимитирующие концентрации кислорода для рыб
(Jones, 1964, Fish and River Pollution. Butterworths, London.)*

Рыба	Концентрация кислорода, мг/л	Температура, °C
Уклейка	0,68—1,44	16
Хиборинхус	2,25	20—26
Американский коричневый сомик	0,3	30
Кумжа	1,13	6,4
»	1,16	9,5—10
»	2,13	18
»	2,8	24
»	1,28—1,6	9,4
»	1,64—2,48	17,2
»	2,9	?
Карп	1,1	30
Карп зеркальный	0,59—2,5	16
Кижуч	1,3	16
»	1,4	20
»	2,0	24
Обыкновенный елец	0,57—1,1	16
Угорь	<1,0	17
Серебряный карась	0,5	10
»	0,6	20
»	0,7	30
Окунь	1,1—1,3	16
Радужная форель	2,4—3,7	16
»	2,5	19—20
»	0,83—1,42	11,1
»	1,05—2,06	18,5
Плотва	0,67—0,69	16
Молодь лосося	2,0—2,2	8
Малоротый окунь	0,63—0,98	15,6
Голец	2,0	10
»	2,2	15
»	2,5	20
»	1,52	3,5
»	2,4	23
»	2,5	19—20
»	1,35—2,35	15,6
Шайнер	2,25	20—26
Трехиглая колюшка	0,25—0,50	?
Линь	0,35—0,52	16
Желтый окунь	2,25	20—26
То же	0,37—0,88	15,5

* В таблице приведены концентрации кислорода, при которых данные виды рыб могут существовать. Как видно из текста, для обеспечения нормальной или даже ограниченной активности необходимы более высокие концентрации кислорода.

Т а б л и ц а 4.5. Минимальные потребности в кислороде некоторых видов рыб (Raunsefell, George A. and Harry Everhart, 1953)

Рыба	Концентрация кислорода, мл/л	Источник
Голец (<i>Salvelinus fontinalis</i>)	1,1	Johoda, 1947
Атлантический лосось (<i>Salmo salar</i>)	2,2	Lindroth, 1949
Большеротый американский черный окунь (<i>Micropterus salmoides</i>)	2,3	Moore, 1942
	0,6	Cooper and Washburn, 1949
	0,38	King and Smith, 1947
Обыкновенная щука (<i>Esox lucius</i>)	2,3	Moore, 1942
Желтый окунь (<i>Perca flavescens</i>)	0,3—0,4	Cooper and Washburn, 1949
Черный краппи (<i>Pomoxis nigromaculatus</i>)	1,5	Moore, 1942
Солнечная рыба (<i>Lepomis gibbosus</i>)	0,3—0,4	Cooper and Washburn, 1949
Ушастый окунь (<i>Lepomis macrochirus</i>)	1,4	Moore, 1942
Сомик (<i>Ameiurus melas</i>)	0,9	Moore, 1942
Нотемигонус (<i>Notemigonus crysoleucas</i>)	0,3—0,4	Cooper and Washburn, 1949
Красноперая щука (<i>Esox vermiculatus</i>)	0,8	Moore, 1942
Чукучан (<i>Erimyzon sucetta</i>)	0,6	Cooper and Washburn, 1949
Окунь (<i>Chaenobryttus coronarius</i>)	0,56	King and Smith, 1947
	0,3	Moore, 1942
	0,2—0,3	Cooper and Washburn, 1949
	0,0*	Moore, 1942
	ниже 0,2	Cooper and Washburn, 1949
	0,3—0,4	Cooper and Washburn, 1949
	0,3—0,4	Cooper and Washburn, 1949
	0,30—0,56	King and Smith, 1947

* Аналитический нуль.

личными видами рыб при разных значениях температуры. Из таблиц видно, что при повышении температуры потребности в кислороде одних и тех же видов увеличиваются. Критические концентрации значительно превышают минимальные. Данные для отдельных видов значительно варьируют. Такая вариабельность может быть связана как с различиями в методиках определения критических и минимальных концентраций, так и с индивидуальными особенностями тестируемых особей. Колебания таких факторов, как температура акклимации и уровень стрессовых воздействий, затрудняют определение минимальных и критических концентраций. Значительные трудности возникают при обобщении данных, полученных разными исследователями, как это сделано в табл. 4.2—4.5.

В табл. 4.2—4.5 приведены диапазоны значений или значения критических и минимальных концентраций. Эти данные полезны для конструкторов, но при разработке проектов желательно иметь более полную информацию. Летальные температуры часто выражают с помощью LD₅₀ (температура, при которой 50 % подопыт-

ных организмов погибают за определенный период времени). Эти сведения также могут быть весьма полезны при проектировании. Однако ни один из этих параметров не учитывает естественных биологических различий между особями. В какой-то мере приближается к этому требованию LD_{50} , но вряд ли найдется инженер, который при разработке проекта будет исходить из 50 %-ной смертности культивируемых объектов, поэтому конструкторам необходим показатель, дающий информацию о критических и минимальных значениях параметров с учетом функции распределения. Эта функция должна отражать колебания критических и минимальных температур для отдельных особей при различном времени воздействия. Получение такой информации требует затрат времени и средств, однако она позволяет правильно выбрать кислородный режим в системе для культивирования.

REFERENCES

- Cooper, Gerald P. and George N. Washburn (1949). Relation of Dissolved Oxygen to Winter Mortality of Fish in Michigan Lakes. Transactions of the American Fisheries Society 76: 23—33.
- Jahoda, W. Y. (1947). Survival of Brook Trout in Water of Low Oxygen Content. Journal of Wilderness Management 11 (1): 96—97.
- Jones, J. R. Erichsen (1964). Fish and River Pollution. Butterworths, London (Reprinted 1966).
- King, Joseph E. and Arthur L. Smith, Jr. (1947). Investigations of the Effect of Water Hyacinth on the Fish and Fish Habitats of Louisiana Waters: U. S. Fish and Wildlife Service, Special Scientific Report 39, App. A: 30—65.
- Lindroth Arne (1949). Vitality of Salmon Parr at Low Oxygen Pressure. Institute of Freshwater Resources, Fisheries Board, Drottningholm, Sweden, 29: 49—50.
- Meteorological Expedition, 1925—27.
- Moore, Walter G. (1942). Field Studies on the Oxygen Requirements of Certain Freshwater Fishes. Ecology 23: 319—329.
- Raymont, John E. G. (1963). Plankton and Productivity in the Oceans. Macmillan, New York.
- Reid, George K. (1961). Ecology of Inland Waters and Estuaries. Reinhold, New York.
- Rounsefell, George A., and W. Harry Everhart (1953). Fishery Science, Its Method and Applications. Wiley, New York.
- Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 13th ed., 2nd, printing (1971). American Public Health Association, Washington, D. C.

Глава 5. ДВУОКИСЬ УГЛЕРОДА И ДРУГИЕ ГАЗЫ

БУФЕРНАЯ СИСТЕМА

Круговорот углерода в природе имеет огромное значение, поскольку все живое на Земле содержит органические соединения. Перенос углерода осуществляется в основном в форме двуокси углерода. Двуокись углерода обладает термодинамической стабильностью в широком диапазоне условий окружающей среды, в частности устойчивостью к окислению, участвует в фотосинтезе,

хорошо растворяется в морской воде или переносится океанскими течениями, быстро диффундирует в атмосферу. Из всех соединений углерода только CO_2 обладает такими физическими и химическими свойствами. Все это делает двуокись углерода идеальным переносчиком углерода (табл. 5.1). Больше всего двуокиси угле-

Т а б л и ц а 5.1. Основные источники углерода в природе
(Encyclopedia of Oceanography, 1966)

Резервуар	Содержание углерода в пересчете на массу $\text{CO}_2 \cdot 10^{18} \text{ г}$
Атмосфера (газ CO_2)	2,41
Гидросфера	
общее неорганическое вещество в океанах ($\text{CO}_3^{=}$, HCO_3^- , MgHCO_3^+ и т. д.)	130
растворенное в океане органическое вещество	10
Литосфера	
карбонатные породы (CaCO_3 и т. д.)	67 000
органический углерод в породах (битум, каменный уголь, нефть и т. д.)	25 000
Биосфера	
живые организмы суши	0,3
органические остатки суши	2,6
морские организмы	0,03
органическое вещество морских осадочных отложений	3,5

рода содержится в карбонатных породах, на втором месте по запасам углерода стоит органический углерод в породах, на третьем — воды океана.

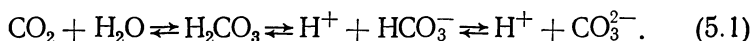
Трудно переоценить значение двуокиси углерода для живых организмов. Двуокись углерода и вода поставляют в протоплазму три важнейших элемента: водород, кислород и углерод. Двуокись углерода играет тройную роль в превращении воды в пригодную для жизни среду. Во-первых, взаимодействуя с водой, она формирует естественную буферную систему, обеспечивающую относительное постоянство pH в водной среде. Во-вторых, двуокись углерода необходима для таких биологических процессов, как фотосинтез, дыхание и прорастание некоторых семян. В-третьих, она является носителем углерода. Этот элемент образует огромное количество соединений. Углерод может формировать длинные молекулярные цепи главным образом благодаря тому, что на его внешней орбите вращаются четыре электрона.

Двуокись углерода поступает в природные воды из многих источников. Она продуцируется при разложении органического вещества, выделяется животными и растениями при дыхании. В подземные воды двуокись углерода попадает при просачивании сквозь почву, где также происходит разложение органических веществ, и выносится в озера, ручьи или океаны. Двуокись углерода обра-

зуется в водной среде при взаимодействии кислот с различными карбонатными соединениями.

Атмосфера, в которой содержится 0,03 % двуокиси углерода, является еще одним ее источником для природных вод. При этом двуокись углерода может непосредственно диффундировать через поверхность раздела вода — воздух или приноситься с осадками, проходящими сквозь толщу атмосферы.

В природных водных системах двуокись углерода редко встречается в виде газа. При растворении двуокиси углерода (CO_2) в воде часть ее участвует в образовании угольной кислоты (H_2CO_3). Эта слабая кислота взаимодействует с такими карбонатсодержащими породами, как известняк (CaCO_3), с образованием бикарбоната кальция $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$. Бикарбонат диссоциирует с образованием водородных и карбонатных ионов, поэтому растворение двуокиси углерода в воде описывается не простым химическим уравнением, а серией уравнений, находящихся в динамическом равновесии:



Таким образом, двуокись углерода находится в воде в четырех формах: свободный газ (CO_2), угольная кислота (H_2CO_3), бикарбонатный (HCO_3^-) и карбонатный (CO_3^{2-}) радикалы. Первые две формы CO_2 и H_2CO_3 вместе называются свободной, или равновесной, двуокисью углерода, а последние две HCO_3^- и CO_3^{2-} — связанной двуокисью углерода. Двуокись углерода в форме HCO_3^- иногда называют полусвязанной.

Химические реакции, описываемые уравнением (5.1), очень чувствительны к концентрации водородных ионов. Поскольку pH по определению является показателем концентрации водородных ионов, реакция, описываемая уравнением (5.1), в большей степени зависит от pH раствора. Математически pH выражается следующим образом:

$$\text{pH} = \log (1/[\text{H}^+]) = -\log [\text{H}^+], \quad (5.2)$$

где $[\text{H}^+]$ — концентрация ионов водорода.

С увеличением pH равновесие в реакциях, описываемых уравнением (5.1), сдвигается вправо, а с уменьшением — влево. Однако химическая система в уравнении (5.1) представляет собой буферную систему, сопротивляющуюся любым изменениям pH. Если в эту так называемую карбонатную систему добавить кислоту, концентрация ионов водорода увеличится. При этом частная реакция 1 [уравнение (5.3)] остается относительно стабильной, поскольку в обеих частях содержатся ионы H^+ :



В частной реакции 2 равновесие сдвигается влево, компенсируя изменение концентрации H^+ -ионов:



Поскольку концентрация угольной кислоты (H_2CO_3) увеличилась, в частной реакции 3 равновесие также смещается, что приводит к увеличению количества двуокиси углерода и воды:



Смещение равновесия в уравнении (5.4) уменьшает количество HCO_3^- . Однако содержание бикарбоната (HCO_3^-) может быть восполнено из карбонатных отложений по реакциям, описываемым следующими уравнениями:



В результате этих реакций [уравнения (5.3)—(5.6)] большая часть ионов H^+ , добавленных в виде кислоты, оказывается связанной в H_2O , H_2CO_3 и HCO_3^- . Связанный водород, входящий в эти три соединения, не изменяет рН. Таким образом, буферная карбонатная система обеспечивает определенное постоянство величины рН. Как видно из приведенного ниже уравнения, реакции, аналогичные описанным выше, происходят при добавлении в систему оснований:



В ходе биологических процессов двуокись углерода выделяется в раствор или поглощается из него. Если в буферную систему [уравнение (5.1)] добавляется двуокись углерода, система буферизует, поддерживая постоянную величину рН. Поглощение двуокиси углерода зелеными растениями требует новой перестройки системы, но она поддерживает рН на прежнем уровне.

На рис. 5.1 показана растворимость двуокиси углерода в воде. На рис. 5.2 представлено парциальное давление двуокиси углерода в морской воде в некотором диапазоне значений рН. Как видно из рисунков, растворимость двуокиси углерода уменьшается с увеличением температуры и солёности. Кроме того, при температурах, характерных для природных вод, двуокись углерода значительно лучше растворяется в воде, чем кислород. Например, при температуре 20°C и давлении 760 мм рт. ст. пресная вода, находящаяся в равновесии с атмосферой, содержит около 7,9 мг двуокиси углерода в 1 л и только около 8,6 мг кислорода в 1 л. В воздухе концентрация кислорода почти в 700 раз превышает концентрацию двуокиси углерода, в то время как в воде, находящейся в равновесии с атмосферой, только в 1,09 раза.

На рис. 5.3 представлен биологический цикл двуокиси углерода в водной системе. Растения потребляют двуокись углерода при

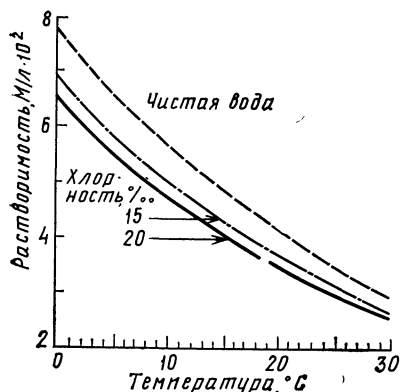


Рис. 5.1. Растворимость двуокиси углерода в чистой и морской воде (Harvey, 1966)

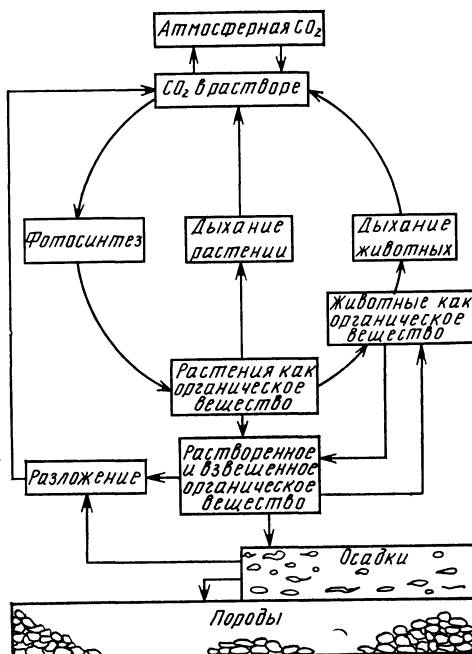
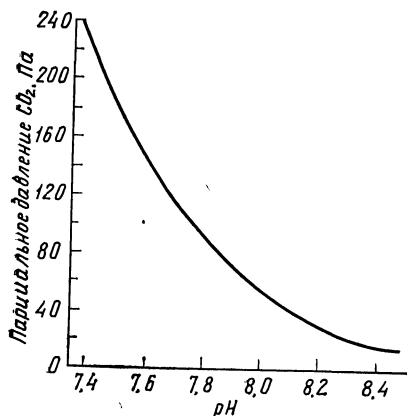


Рис. 5.3. Цикл двуокиси углерода в системе аквакультуры

Рис. 5.2. Парциальное давление двуокиси углерода в морской воде при температуре 16°C и солёности 36‰ (источник тот же)

фотосинтезе и выделяют при дыхании. Поглощаемая растениями двуокись углерода высвобождается при дыхании растений и животных, бактериальном и химическом разложении. Высвобождаемая в результате этих процессов двуокись углерода при фотосинтезе снова включается в круговорот углерода. Водные растения используют извлеченную из воды двуокись углерода как источник углерода.

ПРЕСНОВОДНЫЕ СИСТЕМЫ

Содержание двуокиси углерода в водоемах и водотоках в значительной степени зависит от вида почвы и пород водосборного бассейна. В районах с преобладанием изверженных пород общее количество двуокиси углерода обычно довольно мало из-за недостатка карбонатного субстрата. Содержание биогенных элементов в водоемах и водотоках этих районов также невелико в связи со

слабой растворимостью изверженных пород. Недостаток питательных солей лимитирует биологическую активность и, следовательно, продуцирование двуокиси углерода в процессах дыхания и разложения. Воды озер, рек и ручьев в районах с изверженными породами слегка подкислены (рН около 6) и обладают некоторой коррозионной способностью (Russell-Hunter, 1970).

Пресноводные системы, которые расположены в районах, сложенных преимущественно из известняков, богаты двуокисью углерода. Большинство осадочных пород (например, известняк) мягче изверженных и поэтому разрушаются значительно быстрее. Эти породы и образующиеся на них почвы богаты карбонатами и бикарбонатами, поэтому протекающие по ним воды имеют высокие рН (7,0 и выше), содержат много связанной двуокиси углерода и мало свободной CO_2 . Поскольку двуокись углерода обычно связана в карбонаты кальция и магния в породах, эти воды богаты кальцием и магнием и относятся к жестким водам.

Как уже отмечалось в главе 2, воды часто классифицируются по «жесткости». Хотя жесткость является показателем количества ионов кальция и магния, она также тесно связана с содержанием в воде двуокиси углерода. Поверхностные воды, протекающие через обширные болота, топи, обычно несколько подкислены, что связано с высокими скоростями разложения. Свободная двуокись углерода, продуцируемая в процессах разложения органических веществ, понижает рН этих вод обычно до 4—6. Концентрация свободной двуокиси углерода очень высока (до 200 мг/л), а связанной двуокиси углерода — низка (10 мг/л и менее) (Reid, 1961). Воды с такими характеристиками обычно называют «мягкими». Воды с умеренной жесткостью имеют рН от 7 до 9. Содержание свободной двуокиси углерода в этих водах широко варьирует и может даже превышать уровень равновесного насыщения. Концентрация связанной двуокиси углерода обычно находится в пределах 30—35 мг/л. Высокая жесткость вод характерна для озер и водотоков в районах, сложенных осадочными породами, которые сравнительно легко растворяются. Переходящие при этом в раствор карбонаты подлещивают величину рН выше 8,5. Типичная для этих вод концентрация связанной двуокиси углерода составляет 35—40 мг/л и выше. В некоторых очень соленых озерах концентрация карбонатов может достигать 8500 мг/л (Reid, 1961). В озерах с жесткой водой карбонаты кальция и магния могут выпадать в осадок в виде мергеля.

Зависимость рН от концентрации различных форм двуокиси углерода в пресных водах может быть изображена графически (рис. 5.4). Низкие значения рН «благоприятны» для присутствия свободной двуокиси углерода. При увеличении рН до 8 равновесие сдвигается в сторону образования бикарбоната (HCO_3^-), что приводит к уменьшению количества свободной двуокиси углерода. При рН около 8 почти 100 % двуокиси углерода представлено бикарбонатом. Дальнейшее увеличение рН (более 8) приводит к пропорциональному уменьшению бикарбонатной (HCO_3^-) формы

и увеличению карбонатной (CO_3^{2-}). При pH более 12 вся двуокись углерода представлена карбонатами. Природные воды могут иметь pH от 2 до 12, но в большинстве пресноводных систем pH составляет 6—9. В этом диапазоне основной формой двуокиси углерода является бикарбонат.

Сезонные колебания концентрации двуокиси углерода в димиктическом озере находятся в противофазе с колебаниями концентрации кислорода. Зимой озеро изолировано от атмосферы льдом, образуется градиент концентрации газа от поверхности к дну. Около поверхности, особенно если проникающего сквозь лед света достаточно для фотосинтеза, двуокиси углерода очень мало, а свободная двуокись углерода отсутствует либо присутствует в незначительном количестве. Вода здесь имеет слабую щелочную реакцию, концентрация бикарбонатов в ней низка, а карбонаты отсутствуют. Необходимо помнить, что карбонаты присутствуют только тогда, когда в воде нет свободной двуокиси углерода. В глубинных водах разложение приводит к увеличению концентрации бикарбонатов и свободной двуокиси углерода, но при этом pH и концентрация кислорода снижаются.

В теплых районах умеренной климатической зоны зимой в озерах происходит вертикальная циркуляция, поэтому концентрация двуокиси углерода в них практически одинакова по всей глубине.

Весеннее перемешивание вод охватывает всю глубину голомиктического озера и приводит к выравниванию pH во всей толще вод. Излишки свободной двуокиси углерода, накопленной в зимнее время при разложении органических веществ, высвобождаются в атмосферу. С потерей излишков свободной двуокиси углерода и с увеличением ее потребления при фотосинтезе в поверхностном слое озер с умеренными и жесткими водами связанная двуокись углерода проявляется в виде карбонатов. Это происходит одновременно с развитием летней плотностной стратификации.

В продуктивных голомиктических озерах в летнее время наблюдается обратная зависимость между концентрацией двуокиси углерода и кислорода. В то время как содержание кислорода с глубиной уменьшается, содержание двуокиси углерода несколько увеличивается. В летнее время в эпилимнионе озер с умеренной

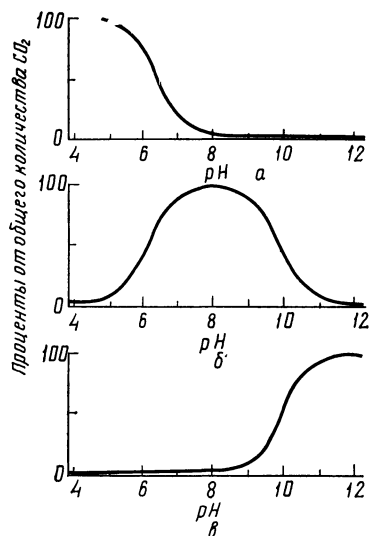


Рис. 5.4. Зависимость между концентрацией ионов водорода и различными формами двуокиси углерода в пресноводных системах: а — свободная двуокись углерода (CO_2 и H_2CO_3); б — HCO_3^- ; в — CO_3^{2-} (Reid, 1961)

и жесткой водой обычно отсутствует свободная двуокись углерода, но присутствует некоторое количество карбонатов.

Во время осеннего перемешивания избыток газа, накопленный за лето при разложении органических веществ в гипolimнионе, высвобождается в атмосферу, и по всей глубине устанавливается одинаковая концентрация. Осеннее понижение температуры способствует поглощению большего количества кислорода. Проточные водные системы, за исключением огромных рек с медленным течением, не имеют выраженного годового цикла двуокиси углерода. Перемешивание предотвращает развитие стратификации и образование градиентов концентрации двуокиси углерода. Основным фактором, определяющим рН и формы углерода в водах рек и ручьев, является химический состав пород, слагающих водосборный бассейн. Биологические процессы (фотосинтез, дыхание, разложение) также оказывают определенное влияние на баланс двуокиси углерода в системе.

МОРСКИЕ СИСТЕМЫ

Концентрация двуокиси углерода уменьшается с увеличением как солености, так и температуры воды. Воды поверхностного слоя океана в полярных районах холоднее, чем в районе экватора, поэтому более холодные полярные воды поглощают двуокись углерода из атмосферы и переносят ее к тропикам. Теплые соленые поверхностные воды тропических районов не могут содержать большого количества двуокиси углерода, поэтому часть ее выделяется в атмосферу. Таким образом, океан работает как насос, «перекачивая» двуокись углерода из полярных районов в тропические.

Описанная выше буферная система существует как в пресных, так и в соленых водах. Однако в соленых водах избыток оснований, или щелочного резерва, делает буферную систему еще более эффективной. В основном рН в поверхностных водах океанов составляет 8,1—8,3 (Raymont, 1963). Однако для океанов в целом диапазон изменений рН шире: от 7,5 до 8,4. Фотосинтез способствует увеличению рН, а дыхание и разложение — уменьшению. Ниже фотической зоны значения рН убывают под влиянием двух последних процессов. В зоне кислородного минимума рН может составлять около 7,7. Ниже этой зоны он постепенно увеличивается и в хорошо аэрируемых (богатых кислородом) глубинных водах достигает примерно 8. В наиболее глубоководных районах океана огромное давление приводит к понижению рН до 7,9. Весьма низкие значения рН наблюдаются в зоне кислородного минимума Тихого океана — около 7,5 (Raymont, 1963).

Соотношение различных форм двуокиси углерода в океанских водах показано на рис. 5.5. Очевидно, что с увеличением рН общее содержание двуокиси углерода в морской воде уменьшается. Когда величина рН достигает 8, концентрация свободной двуокиси углерода снижается до 0. При рН менее 8 ионы CO_3^{2-} в воде практически отсутствуют, с увеличением рН концентрация их уве-

личивается. Концентрация ионов бикарбоната остается высокой и постоянной при увеличении рН до 7,5—8, при дальнейшем росте рН она уменьшается. Буферная система и особенно присутствующие в океане основания увеличивают способность морской воды поглощать двуокись углерода. Если бы, допустим, морская вода была нейтральна (рН 7), т. е. не имела избытка оснований, то при стандартной температуре и давлении (СТД) в 1 л могло бы раствориться только примерно 0,5 см³ двуокиси углерода. При имеющемся избытке оснований в 1 л морской воды можно будет растворить около 45 см³ двуокиси углерода.

Поскольку между рН и общим содержанием двуокиси углерода в морской воде существует непосредственная зависимость, можно подсчитать количество фотосинтетической продукции, обусловленное изменением рН. Например, если в процессе фотосинтеза рН увеличился с 8,16 до 8,31 при температуре 15 °С, из каждого литра воды должно выделиться 2,24 см³ двуокиси углерода. Поскольку 1 моль двуокиси углерода при стандартной температуре и давлении занимает объем 22,4 л, 2,24 см³ соответствуют 0,0001 моль. В одном моле двуокиси углерода содержится 12 г углерода, следовательно в 0,0001 моль — 0,0012 г. Если предположить, что весь углерод, входящий в двуокись углерода, превращен в органическое вещество растительных клеток, то можно считать, что увеличение рН на 0,15 эквивалентно синтезу 1,2 мг углерода (Raymont, 1963).

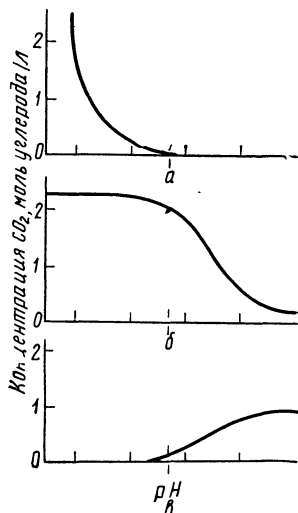


Рис. 5.5. Зависимость концентрации двуокиси углерода от концентрации ионов водорода в морской воде:

a — свободная CO_2 ; *б* — HCO_3^- ; *в* — CO_3^{2-}

СОЛОНОВАТОВОДНЫЕ СИСТЕМЫ

Концентрация двуокиси углерода в солонатоводных системах определяется температурой, соленостью и химическим составом подстилающих пород. Основными биологическими факторами, от которых зависит содержание двуокиси углерода, являются фотосинтез, дыхание и разложение. В верховьях эстуариев преобладают пресные воды. Концентрация двуокиси углерода обусловлена в основном биологическими процессами и температурой. Поскольку температура воды в реке подвержена большим колебаниям, чем в океане, концентрация двуокиси углерода в верхней части эстуария также в значительной степени варьирует. По мере продвижения вод вниз по течению эстуария соленость их увеличивается, что приводит к уменьшению концентраций равновесного насыщения двуокиси углерода. В морской воде содержится избыток основа-

ний, что вызывает уменьшение концентрации свободной двуокиси углерода и увеличение концентрации карбонатов и бикарбонатов. При смешении пресных вод с морскими часто происходят значительные химические изменения, связанные с коагуляцией и осаждением взвешенных частиц, особенно если пресные воды имеют слабую кислую реакцию. Вниз по течению эстуария рН возрастет до 8,1—8,3.

Диапазон изменений рН и концентрации двуокиси углерода в пресноводной (верхней по течению) области эстуария шире, чем в солоноводной (нижней по течению). Кроме того, воды верхней части эстуария менее забуферены, чем воды нижней по течению части, так как последние находятся под влиянием соленых вод с избытком оснований.

Для каждого эстуария характерны определенные закономерности распределения двуокиси углерода, обусловленные колебаниями температуры, солености, притоком пресных вод, приливными явлениями и биологическими процессами, поэтому трудно выявить общие закономерности для всех эстуариев. Однако при отсутствии конкретных данных для эстуария в первом приближении можно считать, что распределение двуокиси углерода обратно распределению кислорода, а распределение рН — обратно распределению свободной двуокиси углерода, в то же время между рН и концентрацией кислорода существует прямая зависимость. (Последнее утверждение также носит предположительный характер и может быть использовано только при отсутствии конкретных данных).

РОЛЬ ДВУОКИСИ УГЛЕРОДА В ЖИЗНЕДЕЯТЕЛЬНОСТИ ВОДНЫХ ОРГАНИЗМОВ

Двуокись углерода обеспечивает фотосинтезирующие растения углеродом, который необходим для продуцирования органического вещества, поэтому содержание ее в воде непосредственно влияет на фотосинтетическую продукцию (рис. 5.6). Ниже точки

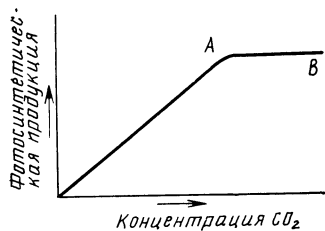


Рис. 5.6. Влияние концентрации двуокиси углерода на фотосинтетическую продукцию растений

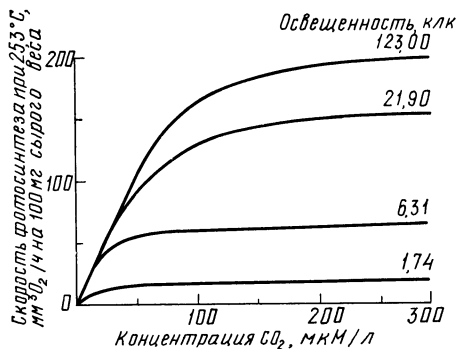


Рис. 5.7. Зависимость скорости фотосинтеза от концентрации двуокиси углерода при различной освещенности (Smith, 1938)

А на рис. 5.6 продукция линейно связана с концентрацией двуокиси углерода. При дальнейшем увеличении концентрации (отрезок *AB*) фотосинтетическая продукция не увеличивается, т. е. уже не зависит от концентрации двуокиси углерода. Изменение наклона кривой в точке *A* свидетельствует о том, что уже не двуокись углерода, а другой фактор лимитирует дальнейшее увеличение продукции. Это явление известно под названием закона минимума, установленного Либихом. Этот закон можно сформулировать следующим образом: продукция увеличивается до тех пор, пока не исчерпаны ресурсы наиболее лимитирующего фактора, необходимого для роста. На рис. 5.6 до точки *A* лимитирующим фактором является двуокись углерода, поэтому увеличение фотосинтетической продукции пропорционально увеличению ее концентрации. Выше точки *A* двуокись углерода перестает быть лимитирующим фактором, и дальнейшее увеличение ее концентрации не отражается на продукции фотосинтеза. На рис. 5.7 показано влияние изменения концентрации двуокиси углерода и освещенности на скорость фотосинтеза. При низкой освещенности продукция лимитируется светом, несмотря на увеличение концентрации двуокиси углерода, кривая на графике очень пологая и почти на всем протяжении параллельна оси абсцисс. При повышенном уровне освещенности количество двуокиси углерода, которое может быть эффективно утилизировано растениями, увеличивается, хотя свет по-прежнему остается лимитирующим фактором, что на рис. 5.7 выражается уменьшением наклона кривой.

Выше уже отмечалось, что содержание двуокиси углерода в атмосфере может лимитировать продукцию зерновых в некоторых высокопродуктивных районах. В водной среде концентрация двуокиси углерода значительно выше. При значениях pH , которые наблюдаются в океанах (8,1—8,3), в воде содержится мало свободной двуокиси углерода, которая наиболее легко усваивается растениями, однако концентрация бикарбонатов и карбонатов высока. Некоторые растения утилизируют непосредственно бикарбонаты, если свободная двуокись углерода отсутствует. То же самое происходит в пресноводных системах при pH более 8, при pH менее 8 свободная углекислота присутствует в водной среде.

Процессы дыхания и разложения органического вещества являются биологическим источником двуокиси углерода в водных системах. Поскольку при этом потребляется кислород, о пригодности системы для водных организмов обычно судят по концентрации кислорода, а не двуокиси углерода, концентрация которой высока. Возможна такая ситуация, когда содержание и кислорода, и двуокиси углерода в воде очень велико, однако вероятность такого совпадения столь мала, что при использовании для определения качества воды системы контроля кислорода можно не принимать ее во внимание. Двуокись углерода, которая преимущественно поглощается кровью, при высоких концентрациях может осложнить условия обитания водных организмов независимо от содержания в воде кислорода.

Содержание двуокиси углерода в системах культивирования гидробионтов можно контролировать, регулируя pH и поддерживая концентрацию кислорода на определенном уровне с помощью аэрирования. Высокая концентрация бактериального и взвешенного органического вещества способствует развитию дефицита кислорода и накоплению двуокиси углерода. В системы для культивирования водорослей двуокись углерода добавляют с целью уменьшения скорости роста.

АЗОТ

Значение азота для водных организмов велико, так как он является составной частью белков. Однако лишь немногие организмы могут усваивать свободный азот, поглощаемый из атмосферы (N_2 или несвязанный азот). Использование молекулярного азота для построения белка требует затрат энергии. Организмы, способные усваивать свободный азот, называются азотфиксирующими. Азот в воде присутствует и в других химических формах (более подробно см. главу 6).

Азот — наиболее распространенный инертный газ пресноводных и морских систем. Поглощение водой атмосферного азота зависит от температуры и солености воды, степени возмущенности поверхности раздела вода — воздух, парциального давления азота в воде, т. е. от тех же факторов, от которых зависит поглощение воды кислорода. В атмосфере содержится 78 % азота, поэтому не удивительно, что в природных водах концентрация азота выше, чем кислорода. С увеличением солености и температуры концентрация равновесного насыщения азота в воде уменьшается.

С азотом обычно связано развитие газовой эмболии, или газопузырьковой болезни. Она возникает у рыб в результате перенасыщения воды азотом, который поглощается кровью до тех пор, пока концентрации его в крови и в окружающей водной среде не сравняются. Если вода перенасыщена азотом, часть его выделяется в крови в виде пузырьков, которые закупоривают кровеносные сосуды, что может привести к тяжелым последствиям для рыб и даже к их гибели. От газовой эмболии часто страдают рыбы, обитающие у дна искусственных водотоков, где значительная турбулентность способствует поглощению водой азота из пузырьков воздуха в нескольких метрах от поверхности. Когда эти воды снова поднимаются к поверхности, они оказываются перенасыщенными азотом в результате уменьшения давления.* Следовательно, это обстоятельство необходимо учитывать при проектировании водосливов, рыбоходных шлюзов и других подобных конструкций.

* В пузырьках парциальное давление азота и кислорода в результате поверхностного натяжения может значительно превышать парциальное давление этих газов в атмосфере. — *Прим. ред.*

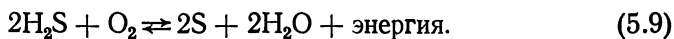
МЕТАН

Метан, или, как его еще называют, «болотный газ», является побочным продуктом анаэробного разложения. В хорошо аэрируемых водах он не продуцируется. Анаэробные условия в озерах чаще всего возникают под термоклином после установления летней стратификации. Сам по себе метан при низких концентрациях, по-видимому, не токсичен для рыб. Однако этот газ продуцируется только в анаэробных условиях, а недостаток кислорода для рыб губителен, поэтому появление метана в системе для культивирования требует принятия неотложных мер. К сожалению, чаще всего его обнаруживают только после замора.

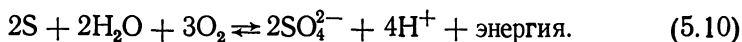
Метан — продукт неполного бактериального разложения органического вещества. Полное разложение, конечными продуктами которого являются двуокись углерода и вода, происходит только в аэробных условиях. Продуцирование метана может происходить при температуре до 5 °С. В любой водной системе могут образоваться отдельные области, где происходит анаэробное разложение и накопление метана. В океанах анаэробные условия развиваются в некоторых глубоких впадинах, отделенных от остальных районов океана поднятием дна. Некоторое количество метана обычно поступает в реки и ручьи с болотными водами. Пока анаэробные области занимают незначительную площадь по отношению к площади системы, проблема разрешима. В системах культивирования с высокой плотностью посадки небольшие области с анаэробными условиями имеют тенденцию к быстрому расширению, что приводит к разрушению системы. В связи с этим, за исключением тех случаев, когда преследуются определенные цели (например, денитрификация), необходимо предотвращать развитие условий анаэробного разложения в хозяйствах аквакультуры.

СЕРОВОДОРОД

Сероводород, как и метан, является продуктом разложения органического вещества. Летом он часто накапливается в придонных водах озер с развитой стратификацией. В подповерхностных и нижних слоях Черного моря сероводород является преобладающим газом. Некоторые бактерии способны перерабатывать сероводород в присутствии кислорода в чистую серу и воду с выделением энергии:



Частицы серы аккумулируются в телах бактерий, и при исчерпании запасов сероводорода в окружающей среде сера используется ими для продуцирования серной кислоты. Этот процесс также сопровождается выделением энергии:



Другая группа бактерий может утилизировать сульфат и другие соединения серы с образованием сероводорода и выделением энергии.

Сероводород в отличие от метана токсичен для многих водных организмов даже при малых концентрациях, поэтому необходимо предотвращать его продуцирование, поддерживая в системе аэробные условия. Появление сероводорода в системе сопровождается характерным для него неприятным запахом, по которому его легко определить. С помощью аэрации можно удалить присутствующий в воде газ и исключить возможность развития условий для его продуцирования.

ДРУГИЕ ГАЗЫ

В табл. 5.2 представлены концентрации некоторых газов в глубинных океанских водах и в атмосфере. Из таблицы видно, что за исключением кислорода, двуокиси углерода и азота, концентра-

Таблица 5.2. Концентрации газов в глубинных океанских водах и атмосфере (Revelle and Suess, 1962)

Газ	Концентрация, мг/л		Доля растворенного в морской воде газа в его общем запасе на Земле, %
	в воздухе	в воде	
O ₂	210	2—8	0,5
N ₂ *	781	13	0,6
He*	52·10 ⁻⁴	0,5·10 ⁻⁴	0,3
Ne*	182·10 ⁻⁴	1,8·10 ⁻⁴	0,3
A	9,32	0,32	1,2
Kr*	10·10 ⁻⁴	0,6·10 ⁻⁴	2,0
Xe*	0,8·10 ⁻⁴	0,07·10 ⁻⁴	3,0
CO ₂	0,3	50,0	60,0

* Данные для проб морской воды, взятых в Тихом океане между Гавайскими островами и о. Рождества (14°12' с. ш., 155°08' з. д.) на глубине 5350 м

ции газов в глубинных водах очень малы. В настоящее время газы (кроме вышеперечисленных), присутствующие в водной среде, изучены слабо. Их значение для океанских биоресурсов неизвестно, и, по-видимому, в жизни водных организмов они не играют существенной роли.

REFERENCES

- The Encyclopedia of Oceanography, Rhodes W. Fairbridge, Ed. (1966). Dowden, Hutchinson & Ross, Stroudsburg, Pa.
 Harvey, H. W. (1966). The Chemistry and Fertility of Sea Waters, 2nd ed. Cambridge University Press, London.
 Raymont, John E. C. (1963). Plankton and Productivity in the Oceans. Macmillan, New York.

Reid, George K. (1961). *Ecology of Inland Waters and Estuaries*. Reinhold, New York.

Revelle, R. and H. E. Suess (1962). *Gases in The Sea*, Vol. I, N. M. Hill, Ed. Wiley—Interscience, New York, p. 313.

Russell—Hunter, W. D. (1970). *Aquatic Productivity: An Introduction to Some Basis Aspects of Biological Oceanography and Limnology*. Macmillan, London.

Sverdrup, H. U., Martin W. Johnson, and Richard H. Fleming (1942). *The Oceans—Their Physics, Chemistry and General Biology*. Prentice—Hall, Englewood Cliffs, N. J.

Smith, Emil L. (1938). Limiting Factors in Photosynthesis: Light and Carbon Dioxide. *Journal of General Physiology* 22: 21—35.

Takahashi, Taro (1966). Carbon Dioxide Cycle in the Sea and Atmosphere, *The Encyclopedia of Oceanography*, Encyclopedia of Earth Sciences Series, Vol. 1, Rhodes W. Fairbridge, Ed. Dowden, Hutchinson & Ross, Stroudsburg, Pa.

Глава 6. БИОГЕННЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ В ВОДНЫХ СИСТЕМАХ

Для существования всех живых организмов необходимы питательные вещества. В этой главе рассмотрены потребности в биогенных веществах и их циклы в водных системах. Приведены результаты исследований сезонного, географического распределения биогенных элементов, а также изменения распределения с глубиной для пресноводных и морских систем. В заключение рассмотрено взаимодействие живых организмов и питательных веществ, влияние стрессов, вызванных изменениями различных параметров природной среды, на потребление биогенных веществ и продуктивность.

ПОТРЕБНОСТЬ В БИОГЕННЫХ ЭЛЕМЕНТАХ

Для существования водных организмов, так же как и наземных, необходимы определенные химические элементы. В организмах эти элементы химически объединяются в сложные молекулы, что обеспечивает трансформирование пищи в энергию в процессе дыхания и построение органических молекул при поглощении солнечной энергии в процессе фотосинтеза. Исследования, проводимые, по крайней мере, в течение 75 лет, позволили определить, какие из 105 химических элементов необходимы для поддержания жизни. Однако, поскольку некоторые элементы требуются в ничтожно малых количествах (значительно меньше 1 мг/л), нельзя с уверенностью утверждать, что выявлены все жизненно важные элементы. После исключения из 90 встречающихся в естественных условиях элементов заведомо неприемлемых, например токсичных и радиоактивных, в качестве предположительно необходимых остаются 52 элемента (Frieden, 1972).

В настоящее время доказана необходимость 25 элементов из этих 52. Список необходимых элементов приведен в табл. 6.1. Пока не получила подтверждения необходимость для организмов алюминия и никеля, однако специалисты считают, что она будет доказана исследованиями, которые проводятся в настоящее время.

Т а б л и ц а 6.1. Химические элементы, необходимые живым организмам
(Frieden, 1972) (Sienko and Plane, 1957)

Элемент	Символ	Атомный номер	Атомный вес (приблизительный)	Содержание в земной коре, %	Содержание в тканях животных организмов, %
Водород	H	1	1	**	63
Бор	B	5	10,8	**	?
Углерод	C	6	12,0	**	9,5
Азот	N	7	14,0	**	1,4
Кислород	O	8	16,0	47	25,5
Фтор	F	9	19,0	**	Следы
Натрий	Na	11	23,0	2,5	»
Магний	Mg	12	24,3	2,2	»
Кремний	Si	14	28,0	28	»
Фосфор	P	15	31,0	**	»
Сера	S	16	32,0	**	»
Хлор	Cl	17	35,5	*	»
Калий	K	19	39,1	2,5	»
Кальций	Ca	20	40,0	3,3	»
Ванадий	V	23	51,0	*	»
Хром	Cr	24	52,0	*	»
Марганец	Mn	25	54,9	*	»
Железо	Fe	26	55,9	4,5	»
Кобальт	Co	27	58,9	*	»
Медь	Cu	29	63,5	*	»
Цинк	Zn	30	65,4	*	»
Селен	Se	34	79,0	*	»
Молибден	Mo	42	96,0	*	»
Олово	Sn	50	118,7	*	»
Йод	I	53	126,9	*	»
Алюминий	Al*	13	27,0	7,9	»
Никель	Ni*	28	58,7	*	»
Всего					99,4

* Необходимость этих элементов для организмов пока не доказана, но ведутся исследования в этом направлении.

** Содержание элементов составляет менее 1%.

Из табл. 6.1 также видно, что относительное содержание элементов в земной коре существенно отличается от их содержания в теле человека. Причина такого несоответствия уже в течение многих лет является предметом научных дискуссий.

Основой жизни можно считать углерод, хотя содержание в земной коре химически родственного ему кремния во много раз выше. С химической точки зрения углерод имеет несколько преимуществ. Двуокись углерода стабильна, легкорастворима в воде, всегда представляет собой единую молекулу. Углерод имеет удивительную способность образовывать длинные молекулярные цепи и стабильные кольцевые структуры с пятью или шестью членами. Кремний относительно нерастворим в воде; молекулы кремния могут образовывать лишь короткие цепи. Длинные цепи могут образовываться лишь при чередовании молекул кремния и

кислорода. Однако эти кремний — кислородные цепи (силиконы) очень стабильны. Углерод — углеродные цепи более стабильны, чем кремний — кремниевые, но менее стабильны, чем кремний — кислородные цепи (Frieden, 1972).

Высокая растворимость двуокиси углерода по сравнению с соединениями кремния явилась определяющей при эволюционном выборе углерода как основы жизни на Земле. Считается, что зарождение жизни произошло в водной среде, а в водных системах содержание углерода в виде двуокиси углерода значительно превосходит содержание кремния. Лишь немногие элементы помимо углерода и кремния обладают химическими свойствами, позволяющими образовывать такое большое число различных соединений.

Большинство живых организмов состоит в основном из кислорода и водорода, входящих в состав воды. Поскольку большая часть живых организмов состоит более чем на 70 % из воды, неудивительно преобладающее содержание в них кислорода и водорода. На третьем месте для большинства организмов стоит углерод. Это и понятно, поскольку углерод входит в состав всех органических молекул. Важное значение для водных организмов имеет кальций; особенно велико его содержание в раковинах моллюсков и подобных им водных животных, имеющих панцирь. Вообще говоря, материал раковины или панциря не является живым веществом и служит только для защиты водных организмов. Внутренний хребет или хрящ (как, например, у акул) также содержит много кальция. Кости можно считать живыми или неживыми в зависимости от определения понятия «живой».

Каждый из необходимых элементов имеет свои функции; одни из них известны, другие еще предстоит изучить. В табл. 6.2 приведены примеры использования живыми организмами различных элементов. Разумеется, перечислены не все функции элементов в живых организмах.

Водные организмы должны извлекать все необходимые элементы из окружающей воды, следовательно, элементы должны существовать в форме (органическая, неорганическая и их сочетание), доступной для водных организмов. Например, большинство растений потребляют азот в неорганической форме в виде нитратов. Тунцы же поглощают азот в основном в органической форме, поедая других рыб.

В естественных пресных водах обычно содержатся анионы: карбонаты, сульфаты, хлориды, фосфаты и нитраты. В сочетании с этими анионами часто встречаются катионы кальция, натрия, калия, магния и железа. Относительное содержание каждого иона в конкретном водоеме зависит от химического состава окружающих горных пород, характеристик водосбора, притока и оттока воды, pH воды и других факторов. Химический состав морской воды довольно постоянен. К основным ионам, присутствующим в морской воде, относятся Cl^- , Br^- , SO_4^{2-} , CO_3^{2-} , H^+ , CO_3^- , F^- , H_3BO_3 , Mg^{2+} , Ca^{2+} , Sr^{2+} , K^+ , Na (Sverdrup et al., 1942).

Т а б л и ц а 6.2. Некоторые функции необходимых элементов в живых организмах

Элемент	Характерная функция
Основные элементы	
Водород	Содержится в воде и органических соединениях; участвует в процессе передачи энергии
Кислород	Содержится в воде и многих органических соединениях; участвует в процессе фотосинтеза и необходим для дыхания
Углерод	Содержится в органических соединениях
Азот	Необходимый элемент белка, хлорофилла и некоторых других соединений
Фосфор	Необходимый элемент для энергопередачи и биохимического синтеза, содержится в ДНК
Калий	Основной клеточный катион
Кальций	Необходим для деления клетки: содержится в стенках клетки, в ферментах, костях и раковинах
Сера	Входит в состав некоторых аминокислот, витаминов и коферментов
Магний	Составная часть хлорофилла; обеспечивает активность многих ферментов
Железо	Составная часть цитохромов, крови и многих ферментов
Микроэлементы	
Бор	В настоящее время его функция неясна
Хлор	Необходим для зубов; основная функция неизвестна
Хром	Связан с сахарным метаболизмом, однако до конца его функция не выяснена
Кобальт	Содержится в витамине B ₁₂ ; обеспечивает активность некоторых ферментов
Медь	Содержится в крови многих беспозвоночных; обеспечивает активность некоторых ферментов
Фтор	Влияет на рост, однако специфическая функция неизвестна
Иод	Содержится в гормонах щитовидной железы
Марганец	Требуется для активности некоторых ферментов, особенно для ферментов, связанных с дыханием и азотным метаболизмом
Молибден	Требуется для некоторых ферментов; влияет на метаболизм фосфора и азота
Селен	Необходим для правильного функционирования печени; предотвращает окислительное разрушение эритроцитов перекисью водорода
Кремний	Необходим для нормального развития костей; конкретная функция неясна
Натрий	Функция неясна
Ванадий	Способствует минерализации зубов; конкретная функция как микроэлемента неизвестна
Цинк	Необходим для активности некоторых ферментов; участвует в синтезе белка

Для обеспечения потребностей живых организмов в любой водной среде необходимы биогенные элементы. Состав и количество биогенных веществ часто определяют продуктивность водной среды, а также тип и разнообразие форм жизни в системе. Вообще говоря, содержание биогенных элементов накладывает два ти-

па ограничений на жизнедеятельность живых организмов. Первое связано с концентрацией некоторых растворенных веществ в воде и в тканях организма. При различной концентрации ионов в окружающей воде и в тканях требуется осмотическая регуляция. Затраты энергии на осморегуляцию увеличивают дыхательные потребности организма и определяют его толерантность к солености. Доступность питательных веществ ограничивает также состав биологических сообществ. Для роста фитопланктона необходимы неорганические питательные вещества, тогда как рост организмов, находящихся на более высоких уровнях пищевой цепи, прямо или косвенно зависит от наличия фитопланктона. Следовательно, недостаток биогенных элементов снижает продуктивность любого района. Для роста некоторых организмов необходимы как органические, так и неорганические растворенные вещества. Недостаток этих веществ также может снизить продуктивность.

КРУГОВОРОТ БИОГЕННЫХ ВЕЩЕСТВ

Круговорот азота. Азот относится к исключительно важным биогенным веществам, поскольку он является необходимым элементом в структуре белков. Азот содержится также в хлорофилле, РНК, ДНК, некоторых коферментах и витаминах. Таким образом, азот необходим для осуществления таких важных процессов, как фотосинтез, дыхание, синтез белка, образование генов и рост.

В водной среде азот встречается в различных формах, чаще всего в виде нитратов NO_3^- , нитритов NO_2^- , аммиака NH_3 , аммония NH_4^+ , свободного газообразного азота N_2 и в виде органических форм, таких, как аминокислоты и белки. Переход из одной формы в другую может происходить в результате простых химических реакций, однако чаще всего он является результатом биологических процессов. На рис. 6.1 схематически представлен круговорот азота в водной среде.

Целью круговорота азота является его многократное использование. На стадии органического вещества азот находится в связанном состоянии в виде белков и других веществ в тканях растений и животных. После гибели организма бактериальное и химическое окислительное разложение приводит к образованию аммиака NH_3 и небольших количеств таких его соединений, как гидроокись аммония и углекислый аммоний. Бактериальное дезаминирование (удаление аминогруппы NH_2 из аминокислоты) — еще один источник аммиака, присутствующего в водных системах.

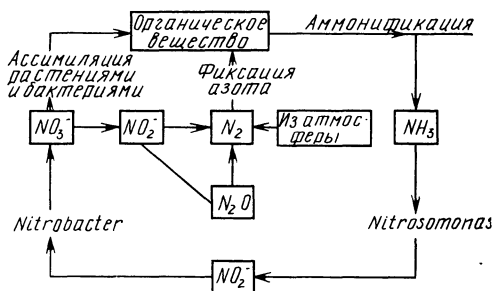


Рис. 6.1. Круговорот азота

Аммиак NH_3 и ион аммония NH_4^+ могут существовать в водной среде одновременно в результате протекания обратимой реакции. Константа равновесия этой реакции в значительной степени зависит от pH среды. В табл. 6.3 приведены значения концентраций неионизированного аммиака NH_3 в растворе гидроокиси аммония при различных pH. Данные, полученные различными исследователями (Burrows, 1964; Liao and Mayo, 1972; Brockway, 1950), подтверждают высокую токсичность NH_3 для водных организмов, в то время как NH_4^+ переносится ими в значительно более высоких концентрациях. Из табл. 6.3 видно, что при значении

Таблица 6.3. Зависимость процентного содержания неионизированного аммиака в растворе гидроокиси аммония от температуры и pH (Burrows, 1964)

pH	Температура, °C			pH	Температура, °C		
	10	15	20		10	15	20
7,0	0,3	0,4	0,5	8,2	5,7	6,5	7,3
7,5	1,1	1,3	1,5	8,3	7,1	8,0	9,1
7,6	1,4	1,6	1,9	8,4	8,9	9,9	11,2
7,7	1,8	2,1	2,4	8,5	11,1	12,3	13,7
7,8	2,3	2,6	3,0	8,8	20,3	22,1	24,2
7,9	2,9	3,3	3,8	9,0	29,1	32,3	35,8
8,0	3,6	4,1	4,7	9,5	57,6	59,8	62,1
8,1	4,6	5,2	6,0				

ях pH выше 7 аммиак присутствует в растворе в значительных концентрациях, что может оказать летальное или сублетальное токсическое действие. Пресноводные искусственные системы с высокой плотностью посадки обычно функционируют при pH от 6,5 до 7,5. В системах с соленой водой pH обычно поддерживается в диапазоне 7—8,5. Таким образом, риск аммиачного отравления в соленой воде выше, чем в пресной.

Образование нитритов NO_2^- в азотном цикле происходит в результате протекания двух процессов. При разрушении аммиака нитрифицирующими бактериями типа *Nitrosomonas* высвобождаются нитриты. Выделяющаяся при этом энергия используется в биологических процессах. Некоторые диатомеи и водоросли, например *Chlorella*, обладают способностью превращать нитраты NO_3^- в нитриты NO_2^- . Такое восстановление — второй источник нитритов в водных системах.

На заключительном этапе круговорота азота происходит окисление нитритов до нитратов бактериями *Nitrobacter* sp. Выделяющуюся энергию бактерии используют в процессе своей жизнедеятельности. Нитраты — это та форма неорганического азота, которая легче всего усваивается большинством растений. * Круговорот

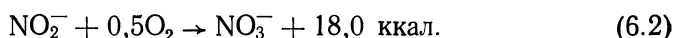
* Наиболее усвояемой формой азота является аммоний, а для того чтобы ассимилировать нитраты, растениям приходится их предварительно восстанавливать до аммония с помощью нитрат-редуктазы. — *Прим. ред.*

завершается поглощением азота растениями, поскольку в растениях азот включается в состав органических соединений.

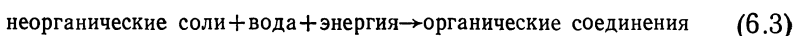
В процессе денитрификации нитрата получается сначала нитрит, а затем газообразный азот N_2 или сначала газообразная закись азота, а затем газообразный азот N_2 . Этот процесс требует дополнительной затраты энергии при использовании неорганического источника водорода и протекает в анаэробных условиях.

В круговороте азота может также происходить и фиксация азота. При этом газообразный азот поглощается и включается непосредственно в состав органических соединений. Этот процесс также требует затрат энергии.

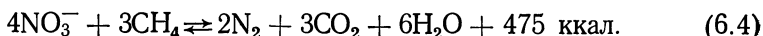
Ниже приводятся химические реакции, характеризующие различные этапы круговорота азота:



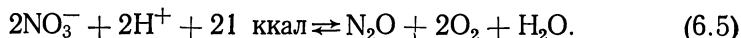
Как уже отмечалось, в ходе реакций, описанных уравнениями (6.1) и (6.2), происходит выделение энергии. Превращение неорганического азота в органический осуществляется при поглощении солнечной энергии. Полное уравнение процесса фотосинтеза имеет вид



Энергетические соотношения при нитрификации зависят от характера источника водорода. Если источник водорода органический, в результате реакции, описанной уравнением (6.4), происходит выделение энергии (Spotte, 1970):



Если водород получается из неорганического источника, для осуществления реакции требуется дополнительная энергия:



Следует отметить, что реакция с использованием органического источника водорода может протекать в отсутствие кислорода. В результате реакции образуются газообразный азот, вода и двуокись углерода. При использовании неорганического источника водорода [уравнение (6.5)] в результате реакции образуется кислород. Энергетические аспекты представлены в виде диаграммы на рис. 6.2. На этой диаграмме вертикальное движение вверх требует затрат энергии. Вертикальное перемещение вниз приводит к выделению энергии, необходимой организмам, участвующим в процессе разложения.

Для стабильных водных систем обычно характерны низкие концентрации аммиака (менее 1 мг/л) и нитритов, а концентрации нитратов пропорциональны количеству поступающего в систему азота. На начальном этапе создания искусственной систе-

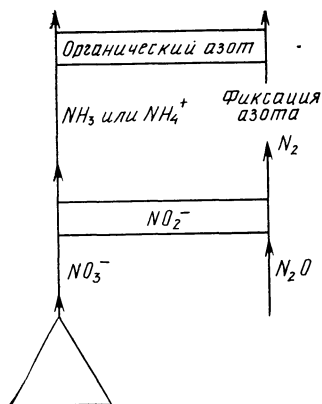


Рис. 6.2. Энергетические уровни различных форм азота

мы или при значительном загрязнении (особенно органическими веществами) естественных водоемов равновесие между различными формами азота нарушается. Обычно в этих случаях происходит увеличение содержания аммиака и нитритов. Аммиак даже в довольно низких концентрациях приводит к гибели рыб и других живых организмов. Например, сеголетки лосося могут испытать стресс, если их выдерживать в течение 12 ч в день в воде, содержащей 0,1 мг/л NH_3 (Burrows, 1964). Нитриты также токсичны, однако их токсичная концентрация значительно выше, чем неионизированного аммиака. Если нитраты — конечный продукт разложения в аэробных системах — не будут по-

глощаться растениями или выводиться из системы другими способами, содержание их будет увеличиваться, но, поскольку нитраты токсичны только при очень высоких концентрациях, это не опасно.

Круговорот фосфора. Фосфор является лимитирующим биогенным элементом для некоторых водных систем. Подобно азоту, фосфор участвует в сложном круговороте, который упрощенно показан на рис. 6.3. Химические формы фосфора в водных системах исключительно разнообразны — от неорганических ионов фосфатов до таких органических молекул, как сахара и ДНК. Химическое равновесие между различными формами зависит от многих параметров, включая pH среды, концентрацию ионов таких металлов, как кальций и алюминий, окислительно-восстановительный потенциал, степень взмучивания донных осадочных отложений и наличие загрязнений.

Поскольку химические реакции, в которые вступает фосфор в водной среде, а также кинетика реакций четко не определены, принято различать следующие формы фосфора: взвешенный органический фосфор, растворенный органический фосфор, взвешенный неорганический и растворенный неорганический фосфор.

На рис. 6.3 представлена схема круговорота фосфора с учетом этой классификации.

Фосфор содержится в различных тканях живых растений и животных. После гибели организмов их ткани разрушаются под действием химических или биологических процессов. При этом образуются все формы фосфорсодержащих соединений: органические и неорганические взвешенные вещества, а также органические и неорганические растворенные вещества.

В любой водной системе эти формы взаимодействуют. Органические формы переходят в неорганические в результате химических

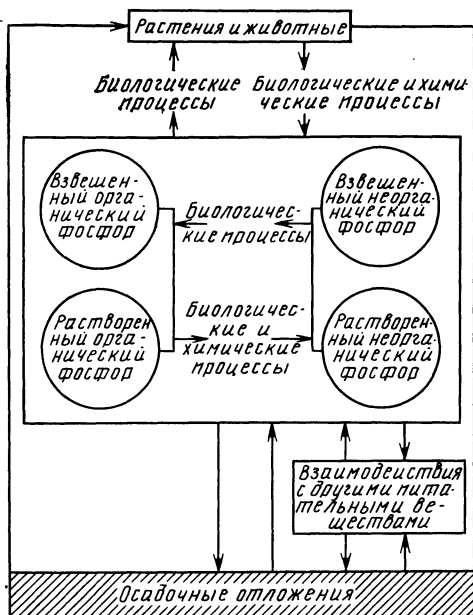


Рис. 6.3. Круговорот фосфора

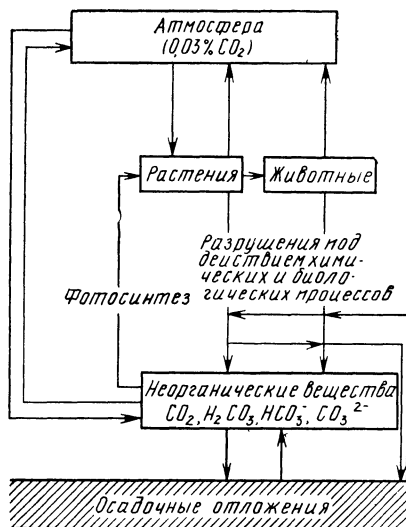


Рис. 6.4. Круговорот углерода

или биологических процессов. Неорганические формы переходят в органические в основном под действием биологических процессов и требуют дополнительной энергии. Превращение взвешенных веществ в растворенные и наоборот может быть следствием как химических, так и биологических процессов. Все четыре формы фосфора могут использоваться непосредственно различными организмами и трансформироваться в тканях других живых организмов.

Взаимодействие между различными формами фосфора происходит как в водном столбе, так и в осадочных отложениях. Поступление фосфора из отложений зависит от химических свойств окружающей среды и характера взаимодействия других ионов с фосфором. Например, значительное количество фосфора поглощается гидроокисями и окисями железа. Уменьшение окислительного потенциала (например, при уменьшении содержания растворенного кислорода) приводит к растворению гидроокисей и окисей железа. При этом высвобождается фосфор и его концентрация в воде увеличивается (Kramer et al., 1972). Сходным образом фосфор вступает во взаимодействие и с другими ионами, что является одной из причин отсутствия полной ясности в вопросе о химических взаимодействиях фосфора.

Взаимодействие фосфора водного столба и осадочных отложе-

ний, по-видимому, способствует поддержанию довольно постоянного содержания фосфора в воде. Когда этот процесс будет изучен, появится возможность регулировать концентрацию фосфора в естественных озерах. В настоящее время более 75 % фосфора, содержащегося в сточных водах, можно удалить его осаждением соединениями алюминия и железа. Однако с экономической точки зрения контролировать содержание фосфора целесообразно только в очень небольших озерах и прудах.

Круговорот углерода. Углерод необходим для образования любого органического соединения. Чаще всего углерод встречается в составе двуокиси углерода CO_2 , бикарбоната HCO_3^- , карбоната CO_3^{2-} , угольной кислоты H_2CO_3 и органических соединений. Круговорот углерода схематически представлен на рис. 6.4.

Основными источниками углерода являются атмосфера и осадочные породы. В атмосфере углерод существует в виде двуокиси углерода, а в осадочных породах в основном в виде карбонатов, чаще всего кальция CaCO_3 и магнезия MgCO_3 . В водных системах содержится также значительное количество органического и неорганического углерода. Органические формы образуются в результате биологического и химического разрушения мертвых растений и животных. К основным неорганическим соединениям относятся углекислый газ, угольная кислота, бикарбонаты и карбонаты. В ходе химических и биологических процессов ткани мертвых растений и животных разрушаются с образованием неорганического углерода; возможно также их осаждение после частичного разложения. Обмен двуокисью углерода, происходящий между атмосферой и водой, поддерживает равновесную концентрацию углерода в воде. Растения, способные фотосинтезировать, поглощают неорганический углерод и на свету преобразуют его в органические соединения углерода. Необходимую для фотосинтеза двуокись углерода растения могут получать непосредственно из воздуха; не имеющие корней водные растения обычно извлекают двуокись углерода из воды. Двуокись углерода, выделяемая растениями и животными при дыхании, поглощается водой, однако, если ее концентрация становится слишком высокой, избыток двуокиси углерода поглощается атмосферой.

Между водой и осадочными отложениями происходит обмен органическим и неорганическим углеродом. Основной запас углерода содержится в карбонатных породах. Растворение карбонатов — один из факторов, обеспечивающий поддержание в течение длительных периодов постоянных значений рН морских и пресноводных систем. В донных отложениях озер и океанов присутствует также органический углерод. Его биологическое и химическое разрушение также приводит к увеличению содержания углерода в водном столбе. Вместе с тем увеличение содержания углерода в донных отложениях происходит при опускании мертвых биологических организмов на дно.

Круговорот железа. Круговорот железа схематически представлен на рис. 6.5. Железо входит в состав многих химических соеди-

нений, присутствующих в водной среде. Самыми распространенными из них являются соединения с двухвалентными Fe^{2+} и трехвалентными Fe^{3+} ионами железа, гидроокись железа, сернистое железо и различные органические соединения. Фосфорнокислое железо — связующее звено в круговоротах железа и фосфора.

Валентность железа в образующихся им соединениях в значительной степени зависит от концентрации кислорода в воде и в осадочных отложениях. Аэробные условия благоприятствуют образованию соединений, содержащих трехвалентное железо. Поскольку трехвалентное железо практически нерастворимо при значениях температур и pH, характерных для природных систем, в аэробных условиях такие соединения выпадают в осадок. Одно из соединений трехвалентного железа — гидроокись железа — часто бывает связано с органическими веществами. При разрушении бактериями органического вещества происходит высвобождение и постепенное выпадение в осадок гидроокиси железа. В результате этого процесса часто образуется озерная охра, с которой связано происхождение железной руды.

Анаэробные условия способствуют образованию соединений, содержащих двухвалентное железо. Поскольку они имеют значительно большую растворимость, концентрация ионов железа значительно больше в анаэробных условиях, чем в аэробных. Однако если в анаэробных условиях выделяется сероводород, трехвалентный ион железа образует с сульфидом практически нерастворимое сернистое железо. Эта реакция ограничивает содержание ионов железа в воде даже в анаэробных условиях. Анаэробные условия способствуют также вымыванию железа из осадочных отложений в результате растворения соединений, содержащих ионы трехвалентного железа. На рис. 6.5 показано влияние на круговорот железа кислорода и сероводорода, а также других веществ, вступающих в реакции с железом, в первую очередь фосфора.

Органическое железо, содержащееся в тканях живых и останках погибших организмов, может в результате химического и биологического разложения переходить в неорганические формы. Часть органического железа непосредственно переходит в осадочные отложения. Существует также несколько видов железобактерий, которые утилизируют энергию, выделяющуюся при окислении различных солей двухвалентного железа, например карбоната или бикарбоната железа (Hatchinson, 1957). К таким железобактериям относятся *Leptothrix ochracea* и *Spirophyllum ferrugineum*.

Круговорот железа сложен и недостаточно изучен. Для уточнения схемы круговорота железа и определения количественных

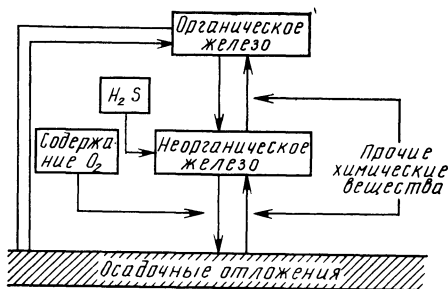


Рис. 6.5. Круговорот железа

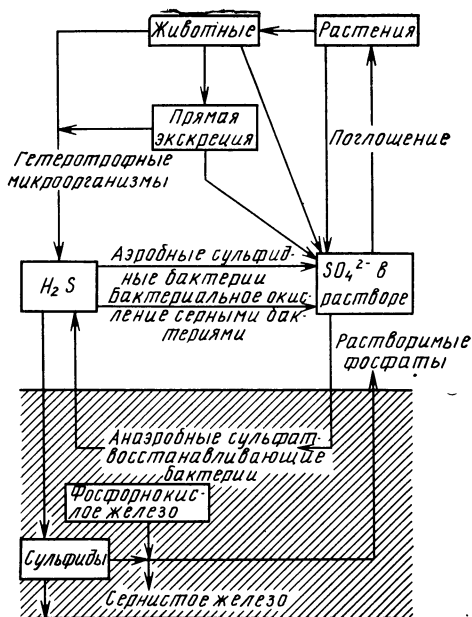
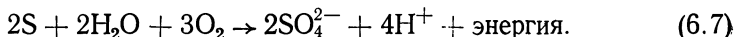
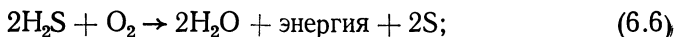


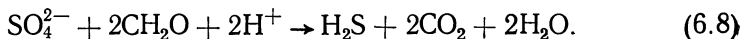
Рис. 6.6. Круговорот серы

поедаются животными. Важную роль в круговороте серы играют серные бактерии различных типов. Аэробные бактерии превращают сероводород сначала в серу, а затем в сульфаты:



Эти бактерии используют энергию, выделившуюся при окислении сероводорода, для осуществления своих клеточных функций. При этом бактерии превращают сероводород — довольно токсичное соединение серы — в нетоксичные сульфаты. Некоторые серные бактерии, такие, как бесцветная, пурпурная и зеленая, а также некоторые аэробные сульфидные бактерии, например *Thiobacilli*, участвуют в одном или нескольких таких процессах.

Анаэробные бактерии типа *Desulfovibrio* преобразуют ионы сульфата осадочных отложений в сероводород в присутствии соединений углерода, обеспечивающих необходимую для этого энергию. Этот процесс описывается следующим уравнением:



Кроме того, круговорот серы связан с круговоротами фосфора и железа. В осадочных отложениях с недостаточным содержанием кислорода происходит осаждение сульфидов. Некоторые из них вступают в реакции с нерастворимыми соединениями фосфора, например с фосфорнокислым железом, и образуют нерастворимые

соотношений различных реакций требуется проведение дополнительных исследований.

Круговорот серы. В природных системах осуществляется также круговорот серы. Чаще всего неорганическая сера встречается в водном столбе в виде сероводорода H_2S и ионов сульфатов SO_4^{2-} . Сероводород обычно является продуктом анаэробного разложения. Ионы сульфатов представляют собой наиболее легко поглощаемую растениями форму серы. Таким образом, в круговороте серы, как и в круговоротах других питательных веществ (рис. 6.6), разложение органической серы происходит с образованием неорганических форм. Неорганические формы поглощаются растениями, которые затем

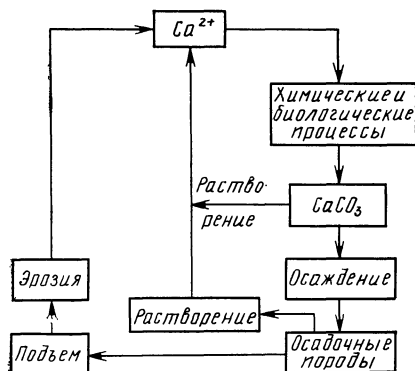


Рис. 6.7. Геохимический круговорот кальция

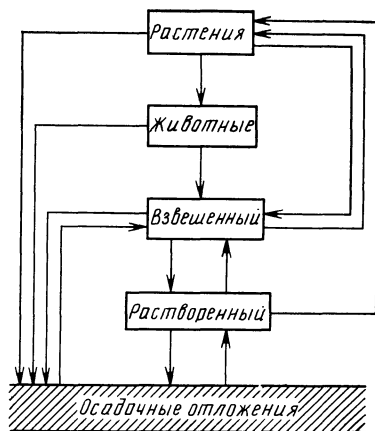


Рис. 6.8. Круговорот кремния

сульфиды железа. Соединение железа и серы приводит к образованию такой растворимой формы фосфора, как HPO_4^{2-} и PO_4^{3-} . Таким образом, в анаэробных условиях и при высоких концентрациях серы содержание сернистого железа увеличивается и соответственно должно увеличиваться содержание фосфора в водном столбе. Реакции, происходящие в круговороте серы, регулируют уровень содержания фосфора в воде. Зависимость между круговоротами различных биогенных элементов наблюдается довольно часто, хотя кинетика и характер этих взаимоотношений еще детально не изучены. Известно, например, что на них влияет pH воды, однако количественные соотношения, определяющие это влияние, пока не получены. Существующие зависимости крайне сложны и изменяются во времени и пространстве в зависимости от изменяющихся характеристик водных систем.

Круговорот кальция. Круговороты кальция и углерода связаны взаимодействием двуокиси углерода, карбонатов и карбоната кальция. Схема геохимического круговорота кальция представлена на рис. 6.7. Этот круговорот осуществляется в течение очень длительных периодов времени, поскольку подъем осадочных пород редко происходит менее чем за несколько тысяч лет. Постоянным источником кальция в водах естественных пресноводных и морских систем является растворение осадочных пород, а также раковин морских организмов типа устриц или двустворчатых моллюсков. Осаждение и образование карбоната кальция происходит в результате биологических и химических реакций. Круговорот кальция зависит также от pH водной среды, влияющего на буферную систему двуокиси углерода (в которой также участвует карбонат). Вместе с тем участие его в буферной системе позволяет поддерживать pH водных систем относительно постоянным.

Круговорот кремния. Кремний утилизируется в первую очередь

в оболочках диатомовых водорослей. Он также содержится в цистах некоторых видов желто-коричневых водорослей и в спикулах кремниевых губок.

Круговорот кремния представлен на рис. 6.8. Кремний присутствует в водной среде в растворенном и взвешенном виде, а также входит в состав наружного скелета диатомовых водорослей и других организмов. Растения поглощают растворенный кремний. Животные получают кремний, поедая растения. Проходя через пищеварительную систему животных, кремний, как правило, не поглощается, а выделяется с экскрементами. Однако прохождение через пищеварительную систему приводит к ускоренному разрушению оболочки диатомовых водорослей. Образующиеся при этом взвешенные частицы кремния могут непосредственно поглощаться растениями или растворяться.

Концентрация кремния в воде зависит от обмена с донными отложениями и от скорости разрушения кремнийсодержащих растений. Таким образом, время цикла кремния зависит от химических и биологических факторов. На круговорот кремния влияют концентрация кислорода, температура воды, концентрация других биогенных веществ. Алуминий, который может образовывать с кремнием комплексные соединения, а также вступает в реакции с фосфором, является связующим звеном между круговоротами фосфора и кремния. Фосфор может также вступать в реакции с серой и железом и связывает круговороты этих веществ с круговоротом кремния.

ПРЕСНОВОДНЫЕ СИСТЕМЫ

Азот. Азот, попадая в водную среду из атмосферы, совершает сложный круговорот (рис. 6.1). В этом круговороте участвуют несколько химических форм азота и биологические системы различных типов. Азот в свободном состоянии попадает в воду либо из атмосферы, либо образуется в результате бактериальной денитрификации нитратов. Свободный азот довольно инертен и может потребляться лишь некоторыми видами бактерий и водорослей. Растворимость его в пресной воде обратно пропорциональна температуре и солёности и прямо пропорциональна давлению.

Другие формы азота попадают в природные пресноводные системы из внешних источников или находятся в связанном состоянии в самих водоемах, однако количество такого связанного азота в настоящее время не известно. К внешним источникам относятся дожди, поверхностный сток, подземные воды и биологические реакции. С дождевой водой азот поступает в водные системы в виде аммиака и нитратов. В водах поверхностного стока содержатся различные формы азота: нитраты, соединения аммиака, нитриты и свободный азот. В водную среду попадают также нитраты, входящие в состав искусственных неорганических и органических удобрений и сточных вод. Подземные воды поглощают соединения азота, проникающие через почву. Источником азотных соедине-

ний является также происходящее в водных системах разложение биологических организмов. Кроме того, некоторые организмы выделяют в воду азотсодержащие соединения.

Органические соединения азота, обнаруживаемые в естественных водоемах, образуются в результате поглощения организмами азота, необходимого для построения тканей и протекания жизненно важных процессов. К таким органическим соединениям азота относятся азотно-углеродные соединения, белки растений и животных, мочевины и мочевая кислота, выделяемая животными. Обычно 50 % или более растворенного азота в отфильтрованной и центрифугированной озерной воде имеет органическое происхождение. От 60 до 80 % этого органического азота представляют собой такие аминокислоты, как аминокислоты, полипептиды и белки (Reid, 1961). В основном эти органические соединения азота образуются при разложении мертвых растений и животных. Однако некоторые виды синезеленых водорослей выделяют органические соединения азота в процессе своей жизнедеятельности, при этом в водную среду поступают такие экстрацеллюлярные азотные вещества, как полипептиды, амиды и аминокислоты.

Содержание органических азотных веществ в большинстве озер зависит от сезона и обусловлено различными факторами, однако, как правило, весной или в начале лета оно выше, чем в другие сезоны, поскольку основное цветение фитопланктона происходит в более теплое время года. Лишь очень небольшая доля органического азота может быть непосредственно использована растениями или животными. Однако суммарная концентрация азота может служить показателем продуктивности, поскольку спустя некоторое время органический азот разрушается с образованием форм, усваиваемых растениями.

В незагрязненных естественных водоемах концентрации неорганических форм азота (аммиак, аммоний, нитриты и нитраты) очень малы; исключение составляет лишь газообразный азот. Эти соединения очень важны для растений, поскольку все они могут усваиваться непосредственно, хотя легче всего усваиваются нитраты. Концентрация газообразного азота определяется главным образом условием равновесия с концентрацией атмосферного азота. На условия формирования равновесия влияет также фиксация азота в воде и анаэробная денитрификация, но об этих процессах известно очень мало.

Как уже отмечалось (см. табл. 6.3), равновесные концентрации аммиака и аммония зависят от значений pH среды. Неионизированный аммиак NH_3 весьма токсичен для всех водных организмов. Например, по данным Кнеппа и Аркина (Кнепп and Arkin, 1972), для канального сомика LD_{50} общего аммония составляла 37,9 мг/л. Хотя для этого случая температура воды не была указана, очевидно, ее значения находились в диапазоне между 20 и 30 °C. При температуре 20 °C и pH 7,8 (см. табл. 6.3) содержание неионизированного аммиака составило 1,13 мг/л. При тех же pH и температуре канальный сомик прекращал питаться при содержа-

нии неионизированного аммиака 0,42 мг/л или общего аммония 14 мг/л. По данным Броквея (Brockway, 1950), увеличение содержания неионизированного аммиака свыше 0,3 мг/л резко снижает содержание кислорода в крови форели. Общее содержание аммония ($\text{NH}_3 + \text{NH}_4^+$) в природных незагрязненных водах обычно не превышает 1 мг/л, т. е. не достигает токсичных значений. Общее содержание аммония в загрязненных водах может быть высоким и они могут быть токсичными, особенно при pH 7,5—8,0. Основными источниками аммиака в естественных системах можно считать процессы разложения белков бактериями и дезаминирования аминокислот.

Поскольку аммиак является продуктом разложения, естественно предположить, что его концентрация будет неодинакова на различных глубинах озера. Концентрация аммиака в верхних слоях незагрязненных озер обычно невелика. В летний период в эвтрофных озерах концентрация аммиака в гипolimнионе в результате разложения возрастает. Осеннее перемешивание приводит к равномерному распределению аммиака по глубине озера. При этом увеличивается его концентрация в поверхностных слоях и уменьшается концентрация в более глубоких слоях. Аналогично аммиак, образовавшийся в нижних слоях озера в зимний период, распределяется по всей глубине озера при весеннем перемешивании. «Цветение» фитопланктона в фотической зоне в весенний и летний периоды увеличивает потребление биогенных элементов и уменьшает концентрацию аммиака в поверхностных слоях.

Существует два источника поступления нитритов. Первый — нитрификация аммония бактериями типа *Nitrosomonas*, при которой высвобождаются нитриты NO_2^- . Энергия, выделяющаяся в этом процессе, используется бактериями при производстве углеводов. Другой источник нитритов NO_2^- — восстановление нитратов NO_3^- . Такой восстановительной способностью обладают некоторые диатомовые и другие водоросли, например *Chlorella*.

Для незагрязненных озер характерны очень низкие концентрации нитритов. Сезонные изменения концентрации нитритов повторяют колебания концентрации нитратов, за исключением зимнего периода. В конце лета концентрации нитритов, так же как и концентрации нитратов, обычно минимальны. Запас нитратов уменьшается к концу сезона роста, поскольку нитраты необходимы всем зеленым растениям. Низкая концентрация нитратов уменьшает количество восстановленных до нитритов нитратов и соответственно концентрацию нитритов в воде. В начале зимы концентрация аммиака и нитратов уменьшается, а концентрация нитритов возрастает (Reid, 1961). Причина этого необычного явления неизвестна. Вертикальное распределение концентрации нитритов имеет максимум между трофогенной и трофолитической зонами. Максимальная концентрация нитратов обычно обнаруживается у нижней границы трофогенной зоны, тогда как для трофолитической зоны характерно высокое содержание аммиака. Экологическое значение, если оно существует, низких концентраций нитритов пока не

выяснено. Высокие концентрации нитритов обычно свидетельствуют о загрязнении водоема сточными водами.

Последним этапом разложения азотсодержащих веществ можно считать окисление нитритов до нитратов, осуществляемое бактериями, например *Nitrobacter*, которые используют энергию, выделившуюся при окислении нитритов до нитратов, в процессе своей жизнедеятельности. Этот этап имеет большое значение для синтеза белка и других процессов, в ходе которых потребляется азот, поскольку азот в форме нитратов легче всего усваивается растениями.

Концентрация нитратов в пресноводных незагрязненных озерах обычно невелика, в среднем около 0,30 мг/л (Reid, 1961). В некоторых очень соленых озерах, например содержащих сульфат магния, в отдельные периоды нитраты могут полностью отсутствовать. В водах оз. Верхнего содержится меньше растворенных веществ, чем в других Великих озерах, обычно около 60 мг/л. Однако, поскольку около 0,86 % всех растворенных веществ приходится на долю нитратов, оз. Верхнее имеет самую высокую концентрацию нитратов из всех Великих озер (Reid, 1961). В нормальных условиях в любой данный момент времени содержание нитритов в растворе обусловлено биологическими процессами: дыханием, ростом и фотосинтезом. Содержание нитратов в системе увеличивается в результате бактериальной нитрификации и уменьшается при поглощении их зелеными растениями и при бактериальной денитрификации с образованием свободного азота.

Период максимальной концентрации нитратов в годовом цикле не постоянен для различных озер и зависит от широты, морфологии водоема, химических характеристик водосбора и продуктивности. Вертикальное распределение нитратов в озере в значительной степени зависит от его продуктивности. В верхнем слое эвтрофных озер наблюдается уменьшение содержания нитратов, связанное с поглощением их планктоном. Уменьшение их концентрации в нижних слоях озера обусловлено бактериальным восстановлением нитратов. Таким образом, максимальное содержание нитратов наблюдается вблизи нижней границы трофогенной зоны. Хотя в некоторых олиготрофных озерах наблюдается лишь незначительная стратификация по содержанию нитратов, обычно в летний период содержание нитратов в верхних слоях уменьшается по сравнению с периодом весеннего перемешивания. Изменение в течение года концентрации нитратов в более глубоких слоях в этом случае незначительно.

В проточных системах концентрация азота является функцией морфологии бассейна, хозяйственной деятельности, осуществляемой в бассейне, турбулентности, биологических процессов и химического состава пород бассейна. Морфологические и химические характеристики бассейна, а также количество выпадающих осадков определяют объем и химические характеристики стока. Хозяйственная деятельность, осуществляемая в бассейне водосбора, определяется характером ландшафта, что в свою очередь обус-

ловливает азотный состав вод бассейна. Внесение в почву удобрений приводит к загрязнению вод в районах с развитым сельским хозяйством, а вблизи больших городов реки загрязняются бытовыми стоками. Турбулентность потока влияет на обмен вод газообразным азотом с атмосферой.

Фосфор. Фосфор необходим живым организмам для передачи энергии внутри клетки, некоторым ферментным системам, а также для осуществления других внутриклеточных функций. Существуют различные мнения относительно того, какой элемент — фосфор или азот — ограничивает продуктивность водных систем. По-видимому, это зависит от системы, однако один из этих двух биогенных элементов определяет продуктивность большинства пресноводных систем.

В водных системах фосфор встречается в нескольких формах. Наиболее важными формами фосфора являются растворимый неорганический фосфор, растворимый органический фосфор и взвешенный органический фосфор. Фосфор образует химические соединения с ионами многих металлов: кальция, железа, магния, натрия и алюминия. В анаэробных условиях сероводород вступает в реакцию с фосфорнокислым железом с образованием сернистого железа и растворимых соединений фосфора. Эти и аналогичные реакции могут существенно влиять на содержание фосфора в водном столбе. Химические реакции, в которые вступает фосфор, зависят от pH среды. От значений pH зависит также растворимость некоторых продуктов этих реакций. Таким образом, химическая активность фосфора весьма непостоянна. Кинетика многих из этих реакций еще до конца не изучена, поэтому в данной книге эти вопросы подробно не рассматриваются. Интересующихся этим вопросом можно отослать к работе Мартина (Martin, 1970). Здесь же достаточно отметить, что концентрация фосфора в любом пресноводном водоеме зависит от многих факторов: морфометрии бассейна (объем, стратификация и перемещение водных масс); химического состава водосбора; характеристики бассейна реки с точки зрения возможности внесения органических веществ в водоем; биологических процессов, протекающих в водоеме; времени круговорота фосфора в воде; pH системы; времени перехода фосфора в осадочные отложения; концентрации ионов кальция, магния и железа; содержания кислорода в воде; температуры воды и времени года.

Сезонные колебания содержания фосфора в озерах весьма значительны, поскольку они в значительной степени определяются формой бассейна, химическим составом водосбора, характером хозяйственной деятельности в районе водосбора, составом других растворенных веществ в воде озера, характером перемешивания в озере, происхождением питающих озеро источников и протекающими в озере биологическими процессами. Содержание фосфора в озерах, имеющих большой приток, может определяться этим притоком, особенно в периоды большого сброса воды. Например, р. Мауми вносит ежегодно 96 т растворимого фосфата в оз. Эри,

однако 68 % этого количества поступает в озеро в течение января и февраля, когда сброс реки максимален (Reid, 1961). В других озерах с более независимой динамикой вод сезонные колебания общего содержания фосфора и его вертикальное распределение связаны довольно сложным образом с реакциями фосфора с другими присутствующими в системе соединениями и характером перемешивания в озере. В эвтрофных озерах в период летней стратификации содержание фосфора в гипolimнионе при уменьшении содержания кислорода резко возрастает. Причины этого явления до конца не выяснены, однако есть данные, подтверждающие существование зависимости между образованием комплексных соединений железа и фосфора и содержанием кислорода. Обоedнение кислородом ведет к восстановлению ионов железа и высвобождению фосфора. В верхних слоях эвтрофных озер низкое содержание фосфора наблюдается в течение всего года. В летний период поверхностные слои могут оказаться полностью обедненными фосфором. В конце лета концентрация фосфора (в основном органического) увеличивается.

Утилизация фосфора бактериями имеет огромное экологическое значение, поскольку они поглощают большие количества фосфора и либо ассимилируют его, либо трансформируют в органическую форму, которая не поглощается зелеными растениями. В отсутствие бактерий водоросли и укорененные растения интенсивно поглощают фосфор. Очевидно, что между бактериями, водорослями и прочими растениями существует конкуренция за фосфор, причем значительная его доля достается бактериям, обладающим повышенной скоростью поглощения. По закону минимума это лимитирует продуктивность водорослей и высших растений, а следовательно, и всей водной системы. В настоящее время нет данных о количествах фосфора, необходимых для роста растений. Полученные в лабораторных исследованиях значения минимально необходимых концентраций часто превышают концентрации, обнаруженные в естественных водоемах, в которых произрастают водоросли. Вместе с тем лабораторные исследования позволяют предположить, что слишком высокие концентрации фосфора ингибируют рост планктона.

Железо. В водных системах железо встречается как в двухвалентной, так и в трехвалентной форме. Соединения двухвалентного железа растворимы только в анаэробных условиях. В присутствии кислорода трехвалентное железо существует в виде коллоидного комплекса с другими неорганическими ионами и простыми продуктами разложения. Недостаток кислорода вызывает переход трехвалентных форм в двухвалентные. Этот переход часто приводит к увеличению концентрации силикатов, фосфатов, бикарбонатов и железа в зависимости от химического состава воды. Следует отметить, что само по себе отсутствие кислорода не вызывает перехода трехвалентных форм в двухвалентные. Разложение органических веществ приводит к обеднению среды кислородом и образованию органических соединений, уменьшающих валентность

железа. Однако в некоторых случаях, например для уменьшения валентности трехвалентного бикарбоната железа, требуется не только низкая концентрация кислорода и присутствие органических соединений, но и наличие нейтральной или кислой среды и высокой концентрации двуокиси углерода.

Вертикальное распределение перечисленных выше соединений железа представляет собой сложную картину. Химические условия эпилимниона большинства озер определяют низкие (обычно менее 0,2 мг/л) концентрации железа в этом слое. Концентрации железа в более глубоких слоях зависят от содержания кислорода и окислительно-восстановительного потенциала. В гипolimнионе олиготрофных озер, где дефицит кислорода наблюдается редко, железо в основном встречается в виде нерастворимых трехвалентных соединений. Для эвтрофных озер в период летней стратификации дефицит кислорода — обычное явление. В этих условиях образуются растворимые соединения двухвалентного железа и концентрация железа в воде снижается.*

Окисление двухвалентного железа в воде, содержащей растворенные соли двухвалентного железа, приводит к образованию гидроокиси железа $\text{Fe}(\text{OH})_3$ — формы, в которой железо легче всего усваивается фитопланктоном.** Чаше всего она представляет собой бесформенную массу, состоящую из железа и органических соединений. Некоторые типы бактерий утилизируют органические компоненты этой массы, что приводит к осаждению побочного продукта — трехвалентной гидроокиси железа; в результате этого образуется озерная охра, из которой затем получается железная руда.

Сера. Вторым, наиболее часто встречающимся в водах североамериканских озер элементом является сера, на долю которой приходится около 15 % всех растворенных твердых веществ. Несмотря на довольно высокое содержание серы оно вдвое меньше содержания карбонатов. В пресноводных системах сера чаще всего встречается в виде сульфатов SO_4^{2-} в сочетании с различными катионами и в виде сероводорода H_2S . Хотя сера не обладает высокой растворимостью, она попадает в водоемы в основном с дождями или в результате растворения серосодержащих геологических образований. В табл. 6.4 приведены средние концентрации некоторых ионов для различных пресноводных водоемов.

Для некоторых озер характерны сезонные изменения концентраций сульфатов, противоположные по характеру изменениям концентраций бикарбонатов. В некоторых из таких озер концентрации сульфатов максимальны весной; в летний период концентрации постепенно уменьшаются и осенью достигают минимальных значений. Причины этого окончательно не выяснены, однако было высказано предположение, что уменьшение содержания сульфатов вызвано восстановлением до сульфидов, поглощаемых донным

* На самом деле концентрация железа в это время увеличивается. — *Прим. ред.*

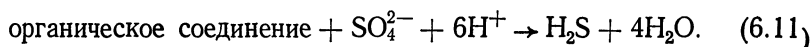
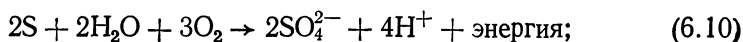
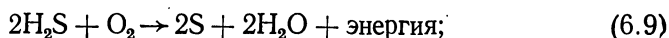
** Легче усваивается двухвалентное железо. — *Прим. ред.*

Таблица 6.4. Ионный состав различных пресных вод (в мг/л) (Reid, 1961)

Ион	Осадки	Сильвер Спрингс, Флорида	Перселлз Понд, Новая Шотландия	Оз. Банни Лэйк, Кали- форния	Оз. Эри	Оз. Сооп Лэйк, Ва- шингтон
Cl	0,5	7,8	7,2	0,2	6,6	5,467
SO ₄ ⁻²	2,0	34,0	9,5	1,3	9,3	6,240
B	0,01	0,01	—	0,01	—	—
Na+K+	0,53	5,1	5,3	0,9	4,9	13,002
Mg ⁺²	0,1	9,6	0,4	0,9	5,7	8,2
Ca ⁺²	0,1—10,0	68,0	0,8	0,7	23,4	20,6
NH ₃ —N	0,5	—	—	0,03	—	—
NO ₃ ⁻ —N	0,2	0,2	—	0,2	—	8,7
pH	4,5	7,7	3,9	5,8—6,3	8,2	9,4—10
HCO ₃ ⁻	—	201,1	Нет	6,0	—	5,209

илом. Очевидно, что концентрация бикарбонатов частично зависит от поглощения двуокиси углерода в процессе фотосинтеза, а частично от участия серной кислоты в растворении карбонатов при окислении сульфидов в зимний период (Reid, 1961).

Утилизация серных соединений осуществляется несколькими типами серных бактерий:



Эти уравнения показывают, что бактерии используют окисление сероводорода и серы как источник энергии для осуществления своей жизнедеятельности. Для производства сероводорода из сульфидов также требуется энергия, выделяющаяся при окислении органических веществ.

Кальций и магний. Суммарное содержание ионов кальция и магния превышает содержание ионов любого другого вещества в пресноводных водоемах. Их концентрация в любой пресноводной системе зависит от химических характеристик водосбора, а также от химических и биологических процессов, происходящих в самой системе. Воды, собранные с территорий с высоким содержанием кальция и магния в породе и почве (например, области со значительным количеством осадочных пород), являются жесткими, т. е. содержат большие количества кальция и магния. Поскольку карбонаты кальция и магния в природе встречаются часто, процессы фотосинтеза, дыхания и разложения влияют на концентрацию этих элементов посредством буферной системы двуокиси углерода. Значительные количества содержащегося в воде кальция расходу-

ются на образование панцирей и костей живых водных организмов. Кальций и в меньшей степени магний образуют соединения с различными фосфорсодержащими веществами. Концентрация кислорода, влияющая на химию фосфора, обуславливает также химию кальция и магния. Хотя существуют многочисленные описания реакций, протекающих в водных системах, они не дают адекватного представления о комплексной картине происходящих изменений.

Концентрации карбоната кальция в реках, так же как и в озерах, зависят от типа и количества водорослей. При благоприятных условиях кальций может осаждаться в виде монокарбоната в результате деятельности растений. Содержание магния в реках колеблется от 500 мг/л до следовых значений. Отношение содержания кальция к содержанию магния для пресноводных систем может составлять от 2:1 до 10:1 и более (Reid, 1961).

Выделение двуокиси углерода из воды в атмосферу или ее потребление в процессе фотосинтеза приводит к осаждению карбоната кальция. Многие виды водорослей и некоторые высшие растения способны осаждать известь (CaCO_3) при поглощении двуокиси углерода в процессе фотосинтеза. Некоторые растения могут потреблять двуокись углерода непосредственно из бикарбоната при отсутствии свободной двуокиси углерода. Было показано, что дефицит фосфатов приводит к уменьшению содержания двуокиси углерода в воде, что ускоряет осаждение карбоната кальция.

Кремний. Породы и почвы земной коры более чем на 60 % состоят из двуокиси кремния (SiO_2), поэтому, хотя кремний почти не растворяется в воде, в низких концентрациях он присутствует в водах всех природных водоемов. По химическим свойствам кремний близок к углероду, однако он нерастворим в воде и не способен образовывать газ при обычных атмосферных условиях.

Кремний не входит в число основных компонентов протоплазмы растений и животных, хотя и относится к необходимым элементам. Он необходим для образования оболочки или скелетов некоторых диатомовых водорослей, цист желтокоричневых водорослей и скелетных спикул некоторых кремниевых губок. Для развития таких диатомовых водорослей, как *Asterionella*, *Melosira* и *Tabelaria*, кремний необходим в концентрации от 0,5 до 0,8 мг/л.

Натрий и калий. По своему лимнологическому значению и геохимическим характеристикам натрия и калий сходны. В водах с низкими концентрациями натрия и калия обычно наблюдается несколько повышенная концентрация натрия. При увеличении концентрации обоих элементов концентрация натрия обычно возрастает значительно быстрее. В мягкой озерной воде концентрации натрия высоки и уступают только концентрациям кальция; в жесткой озерной воде как концентрация кальция, так и концентрация магния превышают концентрации натрия (Reid, 1961).

В водоемах натрия присутствует в виде ионов Na^+ , тетрабората натрия $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$ или сульфата натрия Na_2SO_4 , однако чаще всего встречается ионная форма. Калий также чаще всего встречается в естественных водоемах в ионной форме K^+ .

Прочие элементы. Рассмотренные выше элементы присутствуют в наибольших количествах в пресноводных системах и являются наиболее важными с биологической точки зрения, поскольку они обычно определяют первичную продуктивность этих систем. Однако в пресноводных системах содержится также много растворенных или взвешенных микроэлементов. В необычных условиях одно из этих питательных веществ может лимитировать продуктивность системы. Существует теория, согласно которой в водных системах присутствуют все существующие в природе элементы. Однако в настоящее время эта теория не может быть проверена, поскольку некоторые элементы присутствуют в водных системах в таких малых количествах, что не могут быть зарегистрированы даже самыми совершенными из существующих приборов.

Существует, однако, группа элементов, присутствующих во многих водоемах в достаточных для обнаружения концентрациях. К этой группе относятся марганец, алюминий, цинк, медь, хром, титан, молибден, йод, свинец, барий, бром и стронций, довольно часто встречающиеся в поверхностных водах. В поверхностных водах были также обнаружены многие другие элементы: от тяжелых металлов, таких, как уран и вольфрам, и драгоценных металлов — серебра и золота — до менее экзотических цезия и галлия. Турекян (Turekian, 1969) определил концентрации в естественных водоемах элементов с атомными номерами от 21 до 92. В его работе приведены концентрации, по крайней мере, 43 элементов из 72.

Органические вещества. Во всех естественных водоемах содержатся органические вещества, хотя их концентрация в разных озерах значительно различается. Органические вещества могут быть взвешены или растворены в водоемах. Они могут поступать в пресноводную систему с втекающей в нее водой, в результате волнового и эолового разрушения берегов, а также создаваться в самом водоеме обитающими там живыми организмами. Впадающие в озера реки выносят органическое вещество из своих бассейнов, подземные воды вымывают органические вещества из почвы. Свой вклад в содержание органических веществ вносят и органические загрязнения. В результате протекающих в водоемах биологических процессов, в первую очередь разложения мертвых растений и животных, там образуется органическое вещество. Некоторые организмы выделяют непосредственно в воду органические вещества, образовавшиеся в процессе их жизнедеятельности. В настоящее время относительный вклад органического вещества в результате каждого из описанных выше процессов четко не определен, однако можно сказать, что он значительно различается для разных водоемов и колеблется в зависимости от сезона для каждого конкретного водоема.

Озера значительно различаются как по суммарной концентрации органических веществ, так и по соотношению содержания взвешенного и растворенного органического вещества. Содержание углерода в бедных органическими веществами озерах колеблется от 1 до 2 мг/л, причем углеводы составляют более 73 % об-

щего количества, а белки — около 24 %. В богатых органическими веществами озерах содержание углерода может достигать 26 мг/л, при этом на долю углеводов приходится 90 % и белков — 10 %. В бедных органическим веществом озерах около 16 % органических веществ связано с наличием сестона, в то время как в богатых органическим веществом озерах — только около 4 % (Reid, 1961). Содержание взвешенных веществ в озерах возрастает с увеличением концентрации растворенных органических веществ до достижения некоторой предельной величины; при дальнейшем увеличении концентрации растворенного органического вещества содержание сестона, по-видимому, не изменяется. Было также показано, что содержание белков в органических веществах, вносимых в озеро извне, мало (Reid, 1961).

Часто цвет озера зависит от происхождения содержащихся в нем органических веществ. Органическое вещество, поступающее из торфяных болот или мелководных водоемов с остатками растений, имеет темно-коричневый цвет и характеризуется высоким содержанием углеводов по сравнению с содержанием белков в общем объеме органического вещества. Бесцветные воды содержат в основном органическое вещество, образованное в самом водоеме. Это органическое вещество образуется при разложении планктона и характеризуется относительно высоким содержанием белков. Цвет и происхождение органического вещества, по-видимому, связаны также с продуктивностью планктона. На долю планктона может приходиться не более 3 % общего количества органического вещества в сильно окрашенных водах с высоким содержанием органического вещества, поступившего из внешних источников. В прозрачных водах с низким содержанием органических веществ из внешних источников планктонные остатки могут составлять более 25 % органического вещества (Reid, 1961).

В морской воде, как правило, содержится около 2 мг углерода и 0,2 мг органического азота на 1 л; в озерной воде содержание этих веществ обычно в 3—4 раза выше (Reid, 1961). По-видимому, это обстоятельство влияет на содержание органического вещества в эстуариях, но гораздо большее значение для эстуариев имеют сброс речной воды, характер водосбора, а также размер и тип маршей вокруг эстуария.

Соединения, из которых состоят органические вещества, обнаруженные в пресных и морских водах, исключительно разнообразны. Экологическое значение многих из этих соединений не выяснено. В настоящее время известно, что некоторые бактерии потребляют органические вещества с выделением энергии и образованием побочных продуктов. К соединениям, обнаруженным в пресных и морских водах и донных отложениях, относятся простые по структуре молекулы жирных кислот, свободные аминокислоты, триптофан, глицин, глутаминовая кислота, тирозин, сахара и также такие сахароподобные соединения, как глюкоза, галактоза и многие другие. Из осадочных отложений были также выделены кислоты и парафины. В пресных и морских водах содержатся ви-

тамины А и С. Известно, что в озерной воде содержится до 0,9 мг/м³ ниацина (витамин В₆), а также тиамин (витамин В₁) и биотин (витамин Н). В водах всех природных водоемов обнаружены ферменты, которые, по-видимому, участвуют в некоторых биологических процессах, протекающих в окружающей среде. В пресных водоемах и на морском мелководье было обнаружено желтое каротиноидное вещество, обладающее флуоресцентными свойствами (Reid, 1961).

Некоторые водные организмы, в частности водоросли, выделяют вещества, способные замедлять, стимулировать или регулировать развитие естественных популяций других водорослей. Природа этих веществ в настоящее время точно не известна; тем более непонятен механизм их действия. Существует предположение, что это гормоноподобные вещества или жирные кислоты, а возможно, комбинация тех и других.

МОРСКИЕ СИСТЕМЫ

В большинстве районов океанов к наиболее важным растворенным веществам, недостаток которых лимитирует фотосинтез, относятся фосфор, азот и кремний. Концентрация этих биогенных веществ в глубинных водах океана зависит от первоначального состава водных масс, последующих химических и биологических изменений в них и характера циркуляции в океанах. Для большинства океанов характерна четырехслойная система распределения биогенных элементов: фосфатов, нитритов, нитратов, аммонийного азота и силикатов. Верхний слой составляют воды с низкой концентрацией биогенных элементов, которые относительно однородно распределены по глубине. Во втором слое содержание биогенных элементов резко возрастает с глубиной. В третьем слое на глубине от 500 до 1600 м концентрации биогенных веществ обычно высоки. В самом глубоком четвертом слое, имеющем очень большую толщину, концентрации фосфатов и нитратов относительно мало изменяются с глубиной, однако концентрации силикатов могут значительно колебаться. Концентрация фосфатов, нитратов, нитритов, аммонийного азота и силикатов зависит от многих факторов. Глубинные слои океанов являются огромным резервуаром этих биогенных элементов. Районы апвеллинга обычно высокопродуктивны из-за высокого содержания в водах биогенных элементов. В океанах биогенные элементы обычно содержатся в следующих концентрациях: растворенные неорганические фосфаты — от 0,01 до 0,124 мг/л, нитраты — от 0,006 до 0,700 мг/л, нитриты — от 0,005 до 0,161 мг/л, аммонийный азот — от 0,006 до 0,140 мг/л* (Encyclopedia of Oceanography, 1966). Концентрация этих биогенных элементов для различных районов Мирового океана приведена в табл. 6.5.

* Последние данные. — Прим. ред.

Таблица 6.5. Концентрация биогенных элементов в океанах, морях и эстуариях
(Encyclopedia of Oceanography, 1966)

Район	PO_4^{3-} , мг × × атом/м³	NO_3^- , мг × × атом/м³	NO_2^- , мг × × атом/м³	NH_3 , мг × × атом/м³	Силикаты, мг/атом/м³
Северная Атлантика	0,0—1,25	—	—	—	0,5—35
Западная Атлантика	0,1—2,6	0,1—27,0	—	—	—
Центральная Атлантика	0,1—2,0	5,0—40,0	—	—	—
Западное побережье Африки (24° ю. ш.)	0,8—2,6	—	—	—	—
Экваториальная Атлантика	0,25—1,0	—	—	—	—
Юго-Западная Атлантика	1,7—2,9	—	—	—	10—80
Юго-Восточная Атлантика	1,0—1,5	—	—	—	—
Тихий океан	0,5—3,9	—	—	—	10—170
Экваториальная зона Тихого океана	0,2—2,6	—	—	—	5—30
Индийский океан	0,0—3,3	0,0—36,0	—	—	10—120
Антарктида	1,0—3,0	7,1—39,3	0,02—0,57	3—12	4—60
Северное море	0,0—1,14	0,0—4,3	—	—	—
Норвежское море	0,40—1,17	—	—	—	—
Немецкое море	0,04—0,49	—	—	0,028—0,102	—
Черное море	0,5—6,0	—	—	—	—
Средиземное море	0,1—0,4	—	—	—	—
Балтийское море	0,15—2,0	0,21—5,9	—	1,3—1,9	—
Финский залив	0,19—0,95	0,29—5,7	—	1,6—2,1	—
Ботнический залив	0,076—1,2	0,50—3,5	—	2,6—3,3	—
Пролив Ла-Манш	0,16—0,65	—	—	0,4—1,2	0,72—5,0
Залив Мэн	0,0—1,8	3—15	0,0—0,35	0,0—3,8	—
Пролив Лонг Айленд	0,1—1,0	0,1—8,5	—	—	—
Венесуэльский залив	0,3—1,0	—	—	—	—
Впадина Кариак	2,42	—	—	—	—
Панамский залив	1,0—3,0	—	—	—	—
Саргассово море	0,0—1,35	0,1—3,0	—	—	—
Бухта Фрайдэй (Вашингтон)	1,2—1,7	15—25	0,1—0,4	—	—
Залив Монтерей (Калифорния)	—	—	—	—	10—60
Пролив Пьюджет Саунд (Вашингтон)	0,2—3,0	0,0—37,4	—	—	3,6—250
Район вблизи дельты реки Миссисипи	—	—	—	—	1,5—115
Главная ось течения Куроисио	1,0—3,0	10—36	0,1—0,3	—	—
Район апвеллинга Эну-Нада	1,0—3,0	10—20	0,1—0,4	—	—
Кольский меридиан 33°30' в. д.	0,65—1,14	9,15—19,2	—	—	—
Рижский залив	0,1—0,45	—	—	1,78—2,14	10,7—12,5
Азовское море	0,03—0,58	—	—	8,5—32,1	8,9—26,7

Азот. В океанах, как и в озерах, нитраты являются конечными продуктами разложения органического азота. При этом органический азот последовательно проходит стадии аммонийного азота, нитритов и нитратов. Планктон усваивает все формы неорганического азота; в весенний и летний периоды этот процесс может привести к обеднению поверхностного слоя неорганическим азотом. Регенерация азота осуществляется в основном в результате деятельности бактерий, хотя некоторое разрушение происходит также под действием химических процессов.

Концентрация нитратов в океанах на всех глубинах превышает концентрации других форм азота. Максимальные концентрации нитратов обнаружены на больших глубинах, чем максимальные концентрации фосфора. Это показывает, что образование нитратов протекает медленнее, чем фосфора.

Во всех океанах распределение нитратов и фосфатов носит сходный характер. На рис. 6.9 представлено изменение распределения нитратов с глубиной для Атлантического, Тихого и Индийского океанов. Из рисунка видно, что концентрации нитратов в Атлантическом океане значительно ниже, чем в Индийском или Тихом. Концентрация нитратов в Южном океане почти вдвое превышает их концентрацию в Атлантическом океане.

Все глубинные зоны Атлантического океана относительно богаты нитратами; поверхностные воды Южной Атлантики богаче нитратами, чем воды Северной Атлантики. Такая же картина наблюдается в Атлантическом океане и для распределения фосфатов. Содержание нитратов выше в северной части Тихого океана, чем в его южной части.

В Южном океане концентрации нитратов могут достигать 0,5 мг/л, однако в поверхностных слоях тропической зоны фосфаты и нитраты могут полностью отсутствовать. Из табл. 6.6, в которой приведены изменения концентрации нитратов на разрезе по 30° з. д., отчетливо видна разница между высокими концентрациями нитратов в полярных и низкими концентрациями в тропических поверхностных водах.

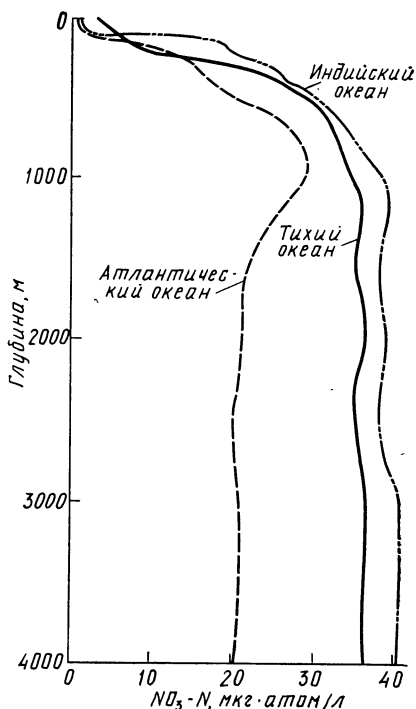


Рис. 6.9. Распределение нитратов в океанах (Sverdrup, Johnson, Fleming. The Oceans: Their Physics, Chemistry and General Biology, © 1942, Renewed, 1970)

Таблица 6.6. Концентрации азота нитратов и нитритов (в мкг азота на 1 л) на разрезе по 30° з. д. в период с апреля по май 1931 г. (Harvey, 1966, The Chemistry and Fertility of Sea Waters, Cambridge Press. By permission)

Глубина, м	57°36'S	53°33'S	16°43'S	38°10'S	21°13'S	3°N	9°N	14°27'N
0	510	—	210	60	2	2	2	3
20	500	—	210	36	0	1	2	1
40	490	490	210	42	0	1	2	1
60	500	490	230	30	0	2	0	1
80	510	490	240	42	0	29	27	1
100	530	500	250	89	1	63	47	28
150	530	510	310	101	1	170	200	170
200	530	530	380	131	7	220	210	200
400	530	540	450	260	100	230	220	210
800	530	530	480	310	240	220	250	240
1500	510	540	450	360	170	220	210	210
2500	510	530	420	330	180	220	210	210
3200	500	—	—	—	—	—	—	—
1500	—	510	450	320	170	—	210	210
4500	—	—	440	—	—	—	210	210
4900	—	—	—	—	280	—	—	—
5300	—	—	—	—	—	—	—	210

Концентрации аммонийного азота максимальны в поверхностных слоях, однако они всегда ниже концентраций нитратов. Максимальные концентрации аммонийного азота (до 0,025 мг аммиака на 1 л) наблюдаются в поверхностном слое в осенний и зимний периоды. Весной содержание аммонийного азота минимально — возможны даже случаи полного его отсутствия. В глубинных водах концентрации аммонийного азота составляют около 0,002 мг аммиака на 1 л (Raymont, 1963). Поскольку аммонийные соединения являются первой стадией трансформации органического азота, естественно, что максимальные концентрации аммонийного азота будут наблюдаться в зимний период (Raymont, 1963). За исключением бескислородных областей, подобных впадине Кариакто, аммонийный азот не встречается в значительных количествах в глубоководных районах ниже экваторической зоны.

Концентрация нитритов в океане обычно невелика (несколько миллиграммов на кубический метр), причем в основном они сосредоточены в поверхностном слое, максимальная глубина их обнаружения 100—300 м. Максимальные концентрации нитритов чаще всего регистрируются непосредственно под фотической зоной (Raymont, 1963).

Фосфор. Фосфор содержится в морских организмах в виде ортофосфорной кислоты, входящей в состав сложных органических соединений, таких, как фосфопротеиды, нуклеопротеиды, нуклеиновые кислоты и фосфолипиды. Скорость круговорота фосфора в поверхностных слоях довольно высока. В верхних слоях океана может происходить химическое разложение простых экскреторных продуктов, однако более важную роль в процессе регенерации иг-

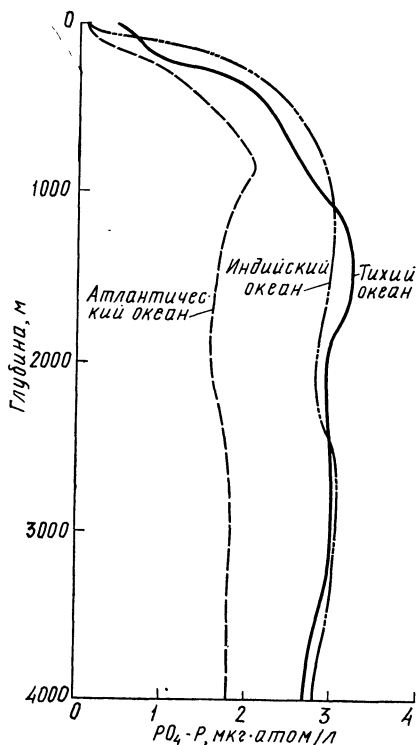


Рис. 6.10. Распределение фосфора в океанах (Sverdrup, Johnson, Fleming. The Oceans: Their Physics, Chemistry and General Biology, © 1942, Renewed, 1970)

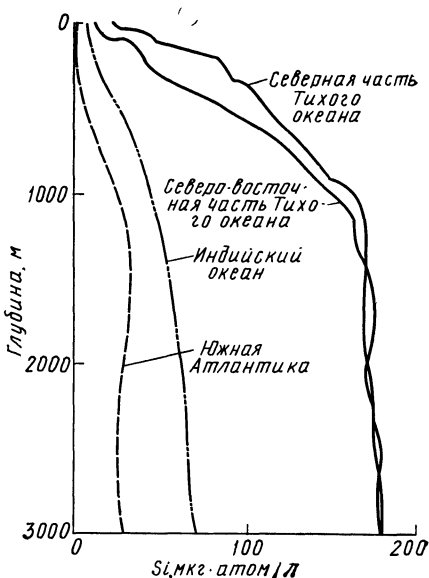


Рис. 6.11. Распределение кремния в океанах (Sverdrup, Johnson, Fleming. The Oceans: Their Physics, Chemistry and General Biology, © 1942, Renewed, 1970)

рает бактериальное разложение органических веществ и остатков. Таким образом, скорость регенерации фосфора зависит от температуры воды и популяции фитопланктона. Поскольку лабораторные исследования показали, что за 17—35 дней от 35 до 55 % фитопланктона минерализуется до фосфатов, на глубинах свыше 300 м содержится очень мало органического фосфора. Проведенные для Черного и Азовского морей расчеты скорости круговорота фосфатов показали, что за год фосфаты совершают от 7 до 8 оборотов (Encyclopedia of Oceanography, 1966).

На рис. 6.10 показано вертикальное распределение фосфатов для различных океанов. На рисунке четко выделяются четыре слоя, описанных выше. В Атлантическом океане на глубине свыше 1000 м содержание фосфатов с юга на север уменьшается. В Атлантическом океане максимальные концентрации фосфатов обнаружены на глубине около 1000 м. В Тихом океане максимальные концентрации фосфатов (0,120 мг/л) обнаружены к северу от эк-

ватора. * Для Южного океана на всех глубинах концентрации фосфатов составляют приблизительно 0,0719 мг/л (Encyclopedia of Oceanography, 1966).

Рост фитопланктона в весенний и летний периоды обычно приводит к обеднению фосфатами вод фототрофных областей. Последующая гибель организмов и регенерация фосфора обеспечивают увеличение концентрации фосфатов.

Железо. Железо — необходимый составной элемент тканей растений и животных. Оно содержится в цитохромной системе и таким образом участвует в процессе дыхания. Концентрации железа в океанах очень низки — от 1 до 5 мкг/л (Raymont, 1963). Железо присутствует в основном в виде очень плохо растворимой в воде гидроокиси железа, которая представлена очень мелкими частицами или коллоидным веществом. В коллоидном виде оно легко усваивается планктоном, хотя механизм поглощения еще не совсем понятен.

Концентрация железа в морской воде подвержена сезонным колебаниям. Максимальные концентрации наблюдаются зимой; весной и летом концентрация обычно снижается, что обусловлено «цветением» фитопланктона. Минимальные концентрации обычно бывают осенью. Поскольку концентрации железа в морской воде очень низки, в поверхностных слоях часто наблюдается дефицит железа. Несмотря на очень незначительные количества железа, необходимые фитопланктону, его рост иногда сдерживается именно недостатком железа.

Кремний. Кремний — биогенный элемент, необходимый всем живым существам, особенно диатомовым водорослям и некоторым другим водным организмам для образования скелетов. В отличие от фосфатов и нитратов регенерация кремния происходит в результате химических, а не биологических процессов **. Судя по всему, разрушение кремния, прошедшего через пищеварительную систему некоторых морских организмов, происходит быстрее, чем кремния, не подвергавшегося биологической обработке. Время круговорота кремния точно не известно, но, по существующим оценкам, оно меньше, чем для фосфатов и нитратов (Raymont, 1963).

Концентрации кремния в океанах значительно колеблются. Изменение численности популяций диатомовых водорослей и различия в процессах регенерации кремния, фосфатов и нитратов обуславливают неодинаковый характер распределения этих элементов. На рис. 6.11 представлено вертикальное распределение кремния в различных океанах. В поверхностных слоях, где кремний утилизируется биологическими организмами, часто наблюдаются концентрации ниже 0,014 мг/л. В глубинных водах Северной Атлантики

* Максимальные концентрации фосфатов наблюдаются в районе Перуанского апвеллинга. — *Прим. ред.*

** Регенерация кремния происходит в результате биохимических и физико-химических процессов. На первом этапе разложения и минерализации диатомовых водорослей преобладают биохимические процессы. — *Прим. ред.*

Таблица 6.7. Концентрация химических элементов (в мг/л) в морской воде при солености 35‰ (Sverdrup, 1942; Encyclopedia of Oceanography, 1966; Raymont, 1964; Brahtz; 1968)

Элемент	Концентрация*	Элемент	Концентрация
Хлор	19353	Медь	0,003
Натрий	10760	Свинец	0,003
Сера	2712	Олово	0,003
Магний	1294	Уран	0,003
Кальций	413	Марганец	0,002
Калий	387	Ванадий	0,002
Бром	67	Титан	0,001
Стронций	8	Торий	0,0007
Бор	4	Сурьма	0,0005
Фтор	1	Цезий	0,0005
Кремний	1	Кобальт	0,0005
Азот	0,8	Галлий	0,0005
Аргон	0,6	Никель	0,0005
Литий	0,2	Церий	0,0004
Рубидий	0,12	Криптон	0,0003
Фосфор	0,07	Лантан	0,0003
Йод	0,05	Неон	0,0003
Барий	0,03	Серебро	0,0003
Индий	0,02	Иттрий	0,0003
Алюминий	0,01	Висмут	0,0002
Железо	0,01	Кадмий	0,0001
Молибден	0,01	Германий	0,0001
Цинк	0,01	Вольфрам	0,0001
Селен	0,004	Ксенон	0,0001
Мышьяк	0,003	Бериллий	0,00005
Хром	0,00005	—	—
Скандий	0,00004	—	—
Ртуть	0,00003	—	—
Ниобий	0,00001	—	—
Таллий	0,00001	—	—
Гелий	0,000005	—	—
Золото	0,000004	—	—
Диспрозий	0,000002	—	—
Эрбий	0,000002	—	—
Гадолиний	0,000002	—	—
Празеодим	0,000002	—	—
Самарий	0,000002	—	—
Иттербий	0,000002	—	—
Гольмий	0,0000008	—	—
Европий	0,0000004	—	—
Лютеций	0,0000004	—	—
Тулий	0,0000004	—	—
Радий	0,0000000003	—	—
Протактиний	0,0000000002	—	—
Радон	0,000000000009	—	—

* Концентрация большинства элементов мало зависит от места и времени измерений. Для элементов, присутствующих в больших концентрациях, эти изменения не имеют значения, однако они могут быть весьма существенны для других элементов.

концентрации кремния составляют 0,98 мг/л; в северной части Тихого океана — около 4,8 мг/л. В глубинных водах Южного и Индийского океанов концентрации кремния достигают 3,4 мг/л (Raymont, 1963). Вообще в океане не существует максимальных концентраций кремния на промежуточных глубинах, как для фосфатов и нитратов. В глубинных водах концентрация кремния возрастает с увеличением глубины.

Марганец. В морской воде марганец присутствует обычно в виде двухвалентного иона, иногда образующего комплексные соединения с органическим веществом. Взвешенный марганец встречается только в поверхностных водах (Encyclopedia of Oceanography, 1966). Хотя необходимость марганца для роста различных видов фитопланктона доказана, в морской воде он обнаружен лишь в очень малых концентрациях: от значений, меньших 0,001 мг/л, до 0,01 мг/л (Raymont, 1963).

Прочие биогенные элементы. В морской воде содержится много других элементов, растворенных или взвешенных. Известно, что некоторые из них утилизируются фитопланктоном и необходимы для его существования (например, медь, цинк, калий и кальций). В морской воде обнаружены и другие элементы, роль которых для океанических систем и необходимость для развития растений еще не выяснены. В табл. 6.7 приведены элементы, содержащиеся в морской воде, и их концентрации. Многие элементы, необходимые для роста растений (например, калий, кальций, магний и сера), присутствуют в воде в достаточных количествах. Содержание других, например азота, фосфора, цинка и меди, как правило, недостаточно для полного удовлетворения потребностей растений.

РОЛЬ БИОГЕННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ В СУЩЕСТВОВАНИИ БИОЛОГИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Влияние биогенных элементов на водные биологические системы аналогично их влиянию на наземные системы. В водной среде также справедлив закон минимума Либиха, согласно которому рост определяется наличием наиболее дефицитного из жизненно необходимых элементов. На рис. 6.12 представлена скорость роста растений в зависимости от концентрации биогенных элементов. Кривая *А* соответствует идеализированной ситуации, кривая *Б* — условиям, встречающимся в природе. Таким образом, добавление биогенных элементов сверх количества, необходимого для достижения максимальной скорости роста, приводит к их потерям и дополнительным затратам. Некоторые растения поглощают биогенные вещества быстрее, если их концентрация в воде превышает концентрацию, необходимую для достижения максимальной скорости роста. Это явление характерно для водорослей и носит название «избыточное поглощение». Избыточное поглощение позволяет растениям запасать биогенные элементы и использовать их в период дефицита биогенных веществ. Такая адаптация повышает конкурентоспособность организмов, обитающих в водной среде, где пе-

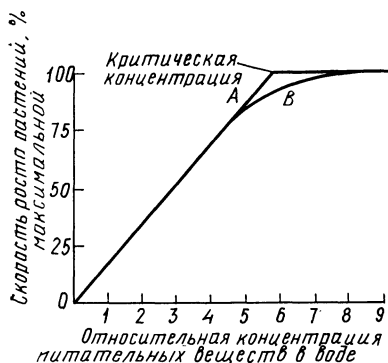


Рис. 6.12. Зависимость скорости роста растений от концентрации биогенных веществ

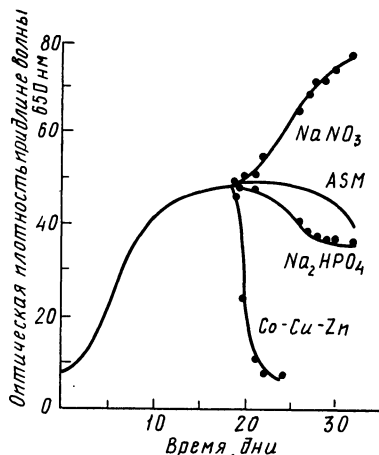


Рис. 6.13. Влияние добавления различных солей на рост *Oscillatoria agardhii* (штамм E10) выращенной на питательной среде ASM (Eberly, 1967)

риоды высокой концентрации биогенных элементов чередуются с периодами их дефицита. Растения, выросшие в условиях избыточного содержания биогенных веществ и обладающие способностью избыточного поглощения, имеют повышенную зольность. Имеются данные, что *Chlorella* и *Scenedesmus* обладают способностью избыточного поглощения фосфатов (Azad and Borchardt, 1970).

Концентрацию биогенных веществ, при которой скорость роста перестает линейно зависеть от концентрации, иногда называют критической. При концентрации выше критической может наблюдаться избыточное потребление биогенных элементов растениями, обладающими такой адаптацией. Ниже критической концентрации избыточное потребление невозможно. Критическая концентрация фосфора не постоянна для водорослей *Chlorella* и *Scenedesmus*, а зависит от величины падающей световой энергии и температуры (Azad and Borchardt, 1970). Увеличение освещенности или температуры снижает критическую концентрацию, по крайней мере, для ограниченного диапазона освещенностей и температур. Причина такого явления до конца еще не выяснена.

Эберли (Eberly, 1967) изучал влияние различных питательных веществ на синезеленые водоросли с использованием двух питательных сред: ASM и ASM-I (табл. 6.8). На рис. 6.13 показано влияние изменения концентрации биогенных элементов в питательной среде на скорость роста штамма E10 синезеленых водорослей *Oscillatoria agardhii*. Этот штамм был выделен из вод оз. Маклиш в штате Индиана. Основной питательной средой была ASM, в которую по одной добавляли различные соли в количествах, необходимых для достижения концентрации этого вещества в среде

Таблица 6.8. Состав питательных сред ASM и ASM-1 (в ммоль/л) (Eberly, 1967)

Соль	ASM	ASM-1	Разница
NaNO ₃	1000	2000	+1000
MgSO ₄	200	200	0
MgCl ₂	200	200	0
CaCl ₂	100	200	+100
K ₂ HPO ₄	100	100	0
Na ₂ HPO ₄	—	100	+100
FeCl ₃	2	4	+2
H ₃ BO ₃	10	40	+30
MnCl ₂	7	7	0
ZnCl ₂	0,8	3,2	+2,4
CoCl ₂	0,02	0,08	+0,06
CuCl ₂	0,0002	0,0008	+0,0006
Na ₂ EDTA	20	20	0

ASM-1. По вертикальной оси откладывали оптическую плотность, которая предполагалась прямо пропорциональной скорости роста водорослей. Изучаемое вещество в каждом случае добавляли на 18-й день роста растения. Увеличение концентрации кобальта, меди, цинка и Na₂HPO₄ замедляло рост. Добавление нитрата натрия резко увеличивало скорость роста.

Некоторым видам водорослей для поддержания роста требуются определенные витамины. К ним относится *Monochrysis lutheri*, которая часто используется в пищу устрицами. Между ростом клеток *Monochrysis lutheri* и концентрацией витамина B₁₂ в среде существует линейная зависимость (Droop, 1961):

$$n = 0,55 \cdot 10^6 (C + 0,1), \quad (6.12)$$

где n — число клеток в 1 мм; C — концентрация витамина B₁₂, г · 10⁻¹²/мл.

Различные штаммы одних и тех же видов могут по-разному реагировать на одинаковые условия роста в зависимости от способности к адаптации. На рис. 6.14—6.16 приведены кривые скорости роста * *Oscillatoria agardhii*, взятой из разных водоемов и выращенной на среде ASM или ASM-1 при температурах от 15 до 20°C. На рис. 6.14 приведены данные для водоросли из оз. Маклиш (штат Индиана). Рис. 6.15 и 6.16 получены для водорослей из озер Гьерсье и Акерсватн в Норвегии. На рис. 6.17 показана скорость роста *Oscillatoria baltica*, взятой из Балтийского моря вблизи Стокгольма (Швеция) и выращенной в средах ASM и ASM-1 при температурах 15 и 20°C. На рис. 6.18 приведены аналогичные кривые для *Oscillatoria rubescens* из озера Стэйнсфьорд в Норвегии, а на рисунке 6.19 — для *Oscillatoria limnetica* из оз. Маклиш в

* Скорость роста измеряли по оптической плотности при длине волны 6500 Å.

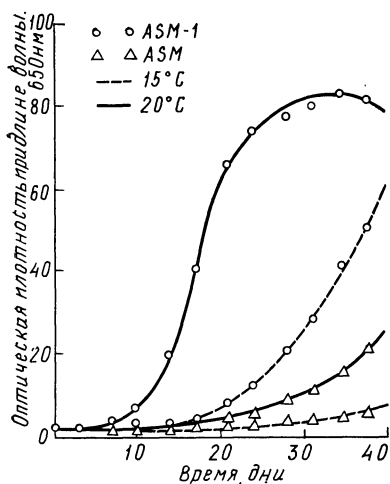


Рис. 6.14. Кривые роста синезеленой водоросли *Oscillatoria agardhii* (штамм E10) на питательных средах ASM-1 и ASM (Eberly, 1967)

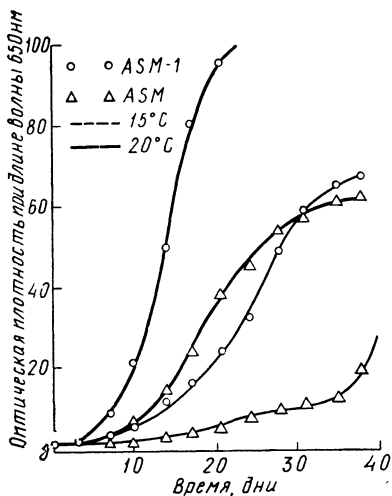


Рис. 6.15. Кривые роста синезеленой водоросли *Oscillatoria agardhii* на питательных средах ASM-1 и ASM (Eberly, 1967)

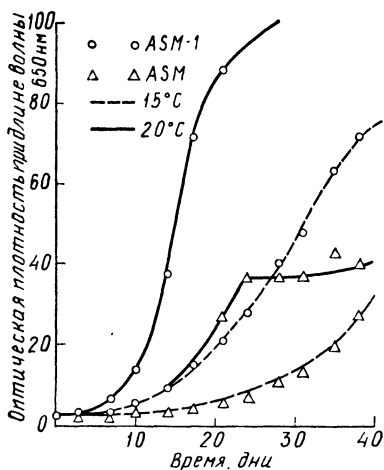


Рис. 6.16. Кривые роста синезеленой водоросли *Oscillatoria agardhii* на питательных средах ASM-1 и ASM (Eberly, 1967)

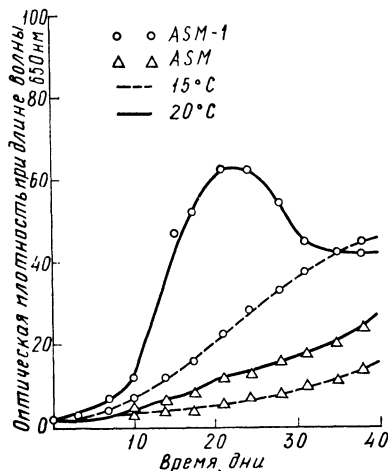


Рис. 6.17. Кривые роста синезеленых водорослей *Oscillatoria baltica* Up2 на питательных средах ASM-1 и ASM (Eberly, 1967)

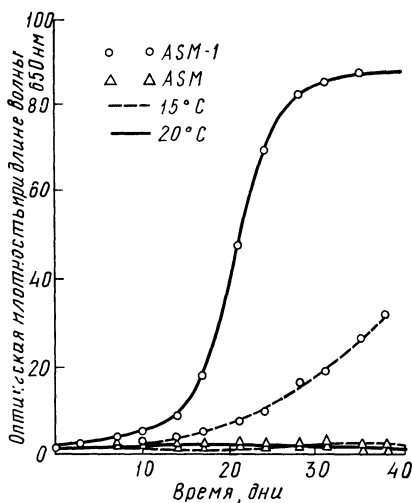


Рис. 6.18. Кривые роста синезеленой водоросли *Oscillatoria rubescens* SkD на питательных средах ASM-1 и ASM (Eberly, 1967)

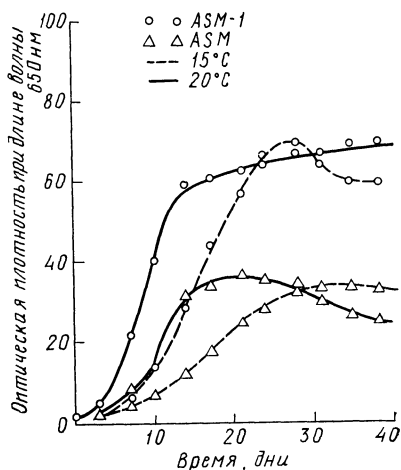


Рис. 6.19. Кривые роста синезеленой водоросли *Oscillatoria limnetica* (штамм E40) на питательных средах ASM-1 и ASM (Eberly, 1967)

штате Индиана. Анализируя рис. 6.14—6.16, можно оценить влияние адаптации различных штаммов одного вида на скорости роста. Рис. 6.17—6.19 позволяют сравнить различные виды *Oscillatoria*.

Колебания концентрации питательных веществ (солей) оказывают дополнительное влияние на жизнь водных организмов посредством изменения осмотического давления. Высокие концентрации солей приводят к увеличению осмотического давления. Поддержание солевого баланса на поверхности организма при наличии разности осмотического давления в воде и тканях требует дополнительных затрат энергии. Если энергетические затраты слишком высоки, организм не в состоянии поддерживать необходимый солевой баланс и погибает. Таким образом, осмотическое давление или содержание солей определяет диапазон солёности, в котором организм может существовать.

ВЗАИМНОЕ ВЛИЯНИЕ ФАКТОРОВ ПРИРОДНОЙ СРЕДЫ

Каждый фактор окружающей среды оказывает определенное влияние на живые организмы. Однако в результате взаимодействия этих факторов характер влияния каждого из них несколько меняется. Например, влияние интенсивности падающего света и температуры взаимосвязано. На рис. 6.20 приведена зависимость относительной скорости поглощения ^{14}C водорослями *Oscillatoria agardhii* isothrix от интенсивности света. При 20°C скорость поглощения значительно выше, чем при 12°C, для одной и той же интенсивности света. По рис. 6.14—6.19 можно проследить зависимость между потреблением биогенных веществ и температурой.

Стрессы, возникающие под действием одного из параметров окружающей среды (например, концентрации кислорода), сужают допустимый диапазон изменений другого параметра, например, температуры. Так, креветка *Macrobrachium rosenbergii*, акклиматизированная при температуре 20°C, способна переносить колебания температур в интервале 12,5—36,5°C при достаточном содержании кислорода. При низких концентрациях кислорода допустимый интервал температур ограничен 12,5—34,3°C (Farmanfarmaian, 1975).

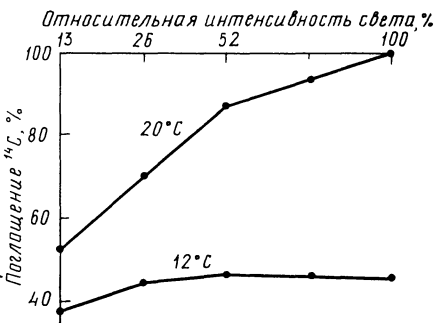


Рис. 6.20. Влияние интенсивности света и температуры на потребление ^{14}C для *Oscillatoria agardhii isothrix* (Eberly, 1967)

На рис. 6.21 схематически показано взаимодействие различных факторов окружающей среды, которое обуславливает сезонные циклы в димиктических озерах. Высокие концентрации неорганических биогенных веществ наблюдаются в конце зимы и в начале весны как следствие разложения органических веществ. Весной возрастает величина солнечного излучения и повышается температура. Это повышение происходит с некоторым запаздыванием по отношению к увеличению солнечного излучения, что связано с высокой удельной теплоемкостью воды. Высокие концентрации неорганических биогенных веществ, повышение температуры и увеличение освещенности вызывают «цветение» фитопланктона. Происходит быстрый рост популяции фитопланктона, трансформирующего неорганические биогенные вещества в органические соединения. Обилие пищи вызывает резкое возрастание численности зоопланктона. В последующий период численность популяции фитопланктона уменьшается в результате выедания его зоопланктоном, и запасы неорганических биогенных веществ сокращаются. Несколько

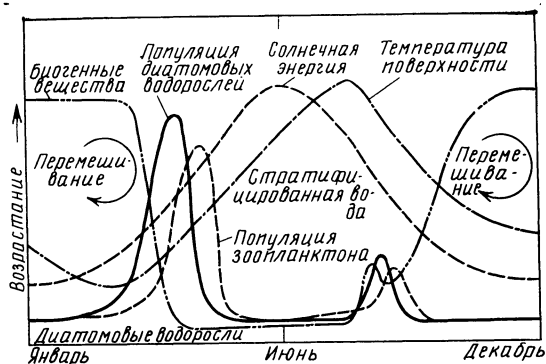


Рис. 6.21. Взаимодействие факторов природной среды в димиктических озерах умеренных северных широт (Clark, 1954)

позднее популяция зоопланктона также уменьшается вследствие уменьшения запасов пищи.

Несмотря на высокие значения температуры и солнечной энергии, недостаток питательных веществ приводит к существенному сокращению продукции планктона по сравнению с весенним максимумом. Разложение органического вещества вызывает осеннее увеличение концентрации биогенных элементов. При еще достаточно высокой освещенности и температуре это приводит к образованию второго осеннего «цветения» фитопланктона, а несколько позднее и к вспышке зоопланктона. В последующий период, когда все биогенные элементы оказываются связанными в органических соединениях и температура понижается, процесс разложения становится доминирующим. При разложении органических веществ образуются неорганические биогенные вещества. На общую картину накладывается также весеннее и осеннее перемешивание. Может также происходить летняя стратификация.

ПРОДУКТИВНОСТЬ ВОДНЫХ СИСТЕМ

При рассмотрении продуктивности океана необходимо остановиться на понятиях биомассы и способах измерения продуктивности. Биомассу можно определить как количество организмов, существующих на данной площади в момент измерения. Обычно она измеряется в миллиграммах связанного углерода в единице объема. Для океанов биомасса составляет от 10 до 1000 мг С/м³ (Encyclopedia of Oceanography, 1966). В табл. 6.9 приведены более подробные данные по биомассе различных водоемов.

В высокоширотных районах биомасса по абсолютной величине обычно выше, чем вблизи экватора. В высоких широтах перемешивание и апвеллинг увеличивают поступление питательных веществ. Увеличение концентрации биогенных элементов и понижение температуры, что сокращает метаболические потребности, обуславливают более высокую биомассу вод в высоких широтах. Такая биомасса может поддерживаться в районах крупных апвеллингов, например у Перуанского побережья Тихого океана или у юго-западного побережья Африки, в районе Бенгельского течения.

При высокой температуре тропических районов рост и регенерация биогенных элементов происходят в ускоренном темпе. Однако стратификация в водном столбе более выражена, что ограничивает круговорот биогенных элементов.

К сожалению, измерение продуктивности дает только мгновенную величину органического вещества, произведенного в данной точке. Сообщество живых организмов в любом водоеме динамично и изменяется во времени. Рост фитопланктона в значительной степени зависит от наличия биогенных веществ и энергии. Как уже отмечалось, эти факторы меняются в зависимости от места и времени. Время года, географическая широта, течения, облачный покров, апвеллинги, запас биогенных элементов и скорость их кру-

Т а б л и ц а 6.9. Биомасса различных районов океанов (Strickland, 1960)*

Район	Время года	Биомасса, мгС/м³
Атлантический океан		
Северное море, в среднем для эвфотической зоны	Конец апреля	55
	Конец мая	25
Кильская бухта, в среднем для эвфотической зоны	Январь (мин.)	80
	Апрель (макс.)	250
	Май (макс.)	100
Северное море, глубина 10—20 м	Январь (мин.)	10
	Июль (макс.)	150
Пролив Ла-Манш, 20 миль от Плимута, поверхностный слой	Август (мин.)	20
	Ноябрь (макс.)	40
Северо-Западная Атлантика, пролив Лонг Айленд, среднее для эвфотической зоны	Март (макс.)	300—600
У побережья Новой Англии, США, в среднем для эвфотической зоны	Зима	100
	Март	100
	Лето	400
Прибрежные воды Флориды	Сентябрь (макс.)	650
Северо-Западная Атлантика, в среднем для эвфотической зоны	Апрель (макс.)	800
	Май (мин.)	300
Саргассово море, в среднем для эвфотической зоны		25**
Тихий океан		
Побережье Калифорнии, США, прибрежные поверхностные воды	Август	50
Северо-восточная часть, продуктивная зона у Алеутских островов	Ноябрь	200
океанический район 55° с. ш., 155° з. д.	Август — сентябрь	20
у полуострова Аляска, 55° с. ш., 135° з. д.	Август — сентябрь	60
у острова Кодиак, 57° с. ш., 153° з. д.	Август — сентябрь	50
Экваториальная зона		
у побережья Эквадора	Ноябрь	35
к востоку от 160° з. д., вблизи поверхности		
диапазон (мин. — макс.)	Ноябрь	5—150
среднее значение	Ноябрь	20
* Цифры в таблице дают только порядок величины.		
** Среднегодовое значение.		

говорота определяют наличие питательных веществ и необходимой энергии в любой точке во времени и пространстве.

Продуктивность в отличие от биомассы определяется количеством связанного углерода в единичном объеме или под единичной площадью морской поверхности за определенный период. Обычно

она выражается в миллиграммах связанного углерода в кубическом метре в день [в мг С/(см³·день)] (иногда кубические метры заменяют квадратными) *. Следует отметить, что эта величина не учитывает потерь на дыхание или в результате гибели организмов, а в основном оценивает ассимиляцию углерода из неорганических источников. Продуктивность различных районов приведена в табл. 6.10.

Продуктивность морской системы очень низка. Валовая океаническая продукция оценивается в $(1,5 \div 20,8) \cdot 10^{10}$ т углерода в год (Nielsen, 1952, Riley, 1944). Аналогичная оценка для районов суши земного шара составляет приблизительно $1,19 \cdot 10^{10}$ т связанного углерода в год. Эффективность такой системы оценивается как отношение энергии, связанной в химических соединениях, к энергии падающего излучения. Полная эффективность морской системы всегда ниже, чем эффективность фотосинтеза, поскольку часть падающей световой энергии отражается, а часть поглощается водой и другими частицами, не участвующими в процессе фотосинтеза. Эффективность продуцирования растений в проливе Лонг Айленд и на банке Джорджес составила 0,3 %. По мере продвижения вверх по пищевой цепи эффективность резко снижается. По существующим оценкам травоядный зоопланктон утилизирует около 0,015 % падающей световой энергии, а эффективность продуцирования у рыб составляет от 0,00005 до 0,0025 %. В лучшем случае только 0,001 % общей продукции растений трансформируется в популяцию промысловых рыб. В таких районах интенсивного рыболовства, как банка Джорджес, человек может использовать в пищу только 0,1 % продукции, а продукция огромных районов океанов вовсе не используется. (Encyclopedia of Oceanography, 1966).

Данные, приведенные в табл. 6.11, свидетельствуют о неточности наших оценок продуктивности конкретной водной системы и об изменении продуктивности по годам. Оценка эффективности системы, основанная на определении величины падающей солнечной энергии и улова рыбы, дает значения от 0,000053 до 0,00026 %. Однако полученные таким образом оценки эффективности неточны по нескольким причинам. Не вся энергия падающего излучения может быть использована для фотосинтеза, поскольку излучение в определенном спектральном интервале в этом процессе не используется и, кроме того, значительная часть энергии идет на нагревание и испарение воды. Вместе с тем пойманная рыба составляет незначительную часть обитающей в водоеме рыбы. Несмотря на эти неточности, банка Джорджес — высокопродуктивный район; но даже в таком районе добывается мало рыбы для удовлетворения потребностей человека. Рыболовство является дешевым, но ог-

* Если известна глубина эвфотического слоя, то умножают на нее величину продукции и получают продукцию под 1 м², которая имеет размерность мг С/(м²·день). — *Прим. ред.*

Таблица 6.10. Продуктивность океанов (Encyclopedia of Oceanography, 1966)

Район	Время года	Первичная продукция, мг С/(м ² ·день)
Атлантический океан		
Арктика		
Ледяной остров ТЗ	Середина лета	24
Станция Альфа	Конец лета	0—6
Западная часть Баренцева моря, вблизи острова Медвежьего		
арктические воды	Май	1300
атлантические воды	Май	275
Норвежское море, вблизи острова Шпицберген		
воды Северной Атлантики	Июнь	2400
арктические воды	Июнь	400—600
Север Северной Атлантики		
Фареро-Исландский хребет	Лето	650—2700
вблизи Исландии	»	530—1300
к югу от Гренландии	»	550
море Ирмингера	»	150—250
Северное море		
годовые изменения	Весь год	100—1500
северо-восточное побережье Англии	Май	200
	Октябрь	110
	Февраль	5
Датские прибрежные воды	Мартовское «цветение»	300
	Август (макс.)	700
	Декабрь (мин.)	10
Восточная часть Северной Атлантики		
15 миль от Опорто	Сентябрь	100
200 миль от Опорто	Сентябрь	150
Средиземное море		
2 мили от побережья Франции	Середина лета	30—40
Запад Северной Атлантики		
континентальный шельф и прибрежные воды		
весеннее «цветение»	Весна	1930
среднее значение		560
взвешенное среднегодовое		330
Саргассово море	Апрельское «цветение»	890
	Лето	100—200
Карибское море 10—20° с. ш.		100—200
Экваториальная Атлантика		
западная часть		
у 20° с. ш.	Февраль	60—100
8°15' с. ш.	Апрель — май	230—300
8°15' ю. ш.	Март	70—280
15°45' ю. ш.	Апрель	20—130
восточная часть		
у 20° с. ш.	Февраль	190—780
8°15' с. ш.	Апрель — май	180—1480
8°15' ю. ш.	Март	100—370
15°45' ю. ш.	Апрель	90—420
Юго-Западная Атлантика		
залив Уолфиш и Бенгельское течение	Декабрь	500—4000

Район	Время года	Первичная продукция, мг С/(м ² ·день)
Районы Тихого океана		
Экваториальная зона Тихого океана		
у побережья Эквадора	Осень	300—1000
9° с. ш., 90° з. д.	Ноябрь	410—800
11° с. ш., 115° з. д.	Осень	10
30° с. ш. — 30° ю. ш.	Март	100—250
Северо-западная зона Тихого океана		
Японское море		
течение Куроисио	Лето	50—100
система Ойясио	Лето	250—500
Охотское море к северу от Японии		
диапазон изменений	Май	6—5100
среднее значение	Май	2000
Районы Индийского океана		
экваториальная зона		200—250
Индийского океана		

Таблица 6.11. Средняя оценка чистой продуктивности и биомасса на банке Джорджес (Encyclopedia of Oceanography, 1966)

Трофический уровень	Чистая продуктивность, Дж/(м ² ·день)	Биомасса, Дж/м ²
Падающая энергия излучения	12600000	12600000
Диатомовые водоросли	0—38000	84000—167000
Зоопланктон	0—1800	40000—155000
Улов рыбы (среднее значение за 1923—1945 гг.)	6,7—32,2	—

раниченным источником белков. Кроме того, это очень неэффективная система производства пищевых продуктов для человечества. Количество получаемой продукции непостоянно и зависит от погодных условий. В продукции нет единообразия, невозможно создать ее надежный запас. Искусственные системы могут решить многие проблемы рыбного хозяйства. Во второй части книги рассмотрены вопросы создания искусственных систем для разведения рыбы.

REFERENCES

- Azad, Hardam S. and Jack A. Borchardt (1970). Variations in Phosphorus Uptake by Algae. *Environmental Science and Technology* 4 (9): 737—743.
- Bennett, George W. (1962). *Management of Artificial Lakes and Ponds*. Reinhold, New York.
- Brahtz, John F. (1968). *Ocean Engineering*. Wiley, New York.
- Brockway, Donald R. (1950). Metabolic Products and Their Effects. *Progressive Fish—Culturist* 12(3): 127—129.
- Burrows, Roger E. (1964). Effects of Accumulated Excretory Products on Hatchery — Reared Salmonids. U. S. Fish and Wildlife Service, Research Report No. 66.
- Chemistry of Nitrogen and Phosphorus in Water (1970). *American Water Works Journal* 62: 127—140.
- Clarke, George L. (1954). *Elements of Ecology*. Wiley, New York.
- Devlin, Robert N. (1966). *Plant Physiology*. Reinhold, New York.
- Droop, Robert N. (1961). Vitamin B₁₂ and Marine Ecology: The Response of *Monochrysis lutheri*. *Journal of the Marine Biology Association of the United Kingdom* 41: 69—76.
- Eberly, William R. (1967). Problems in the Laboratory Culture of Planktonic Blue—Green Algae, in *Proceedings of a Symposium on Environmental Requirements of Blue—Green Algae*. Federal Water Pollution Control Administration. Corvallis, Wash., September 23—24, 1966.
- Farmanfarmaian, F. (1975). Integration of Thermal and Food Processing Residuals into a System for Commercial Culture of Fresh Water Shrimp. Report on Grant No. CI—4925, National Science Foundation. Research applied to national needs program.
- Frieden, Earl (1972). The Chemical Elements of Life. *Scientific American* 227 (1): 52—59.
- Harvey, H. W. (1966). *The Chemistry and Fertility of Sea Water*, 2nd ed. Cambridge University Press, Cambridge, England.
- Hutchinson, G. Evelyn (1957). *A Treatise on Limnology*, Vol. 1, Geography, Physics and Chemistry, Wiley, New York.
- Jeffrey, Lela M. (1966). Nutrients in the Sea, in *Encyclopedia of Oceanography*, Rhodes W. Fairbridge, Ed. Dowden, Hutchinson & Rosse, Stroudsburg, Pa.
- Jones, J. R. Erichsen (1964). *Fish and River Pollution*. Butterworths, London.
- Knepp, G. L. and G. F. Arkin (1972). Ammonia Toxicity and Nitrate Tolerance for Channel Catfish (*Ictalurus punctatus*). Paper No. 72—537. American Society of Agricultural Engineers, St. Joseph, Mich.
- Kramer, James R., Stephen E. Herbes, and Herbert E. Allen (1972). Phosphorus: Analysis of Water, Biomass and Sediment, Nutrients in Natural Waters, Herbert E. Allen and James R. Kramer Eds. Wiley—Interscience, New York, pp. 51—100.
- Liao, Paul B. and Ronald D. Mayo (1972). Salmonid Hatchery Water Reuse Systems. *Aquaculture* 1: 317—335.
- Martin, Dean F. (1970). *Marine Chemistry. Theory and Applications*, Vol. 2, Dekker, New York.
- McGill, David A. (1966). Fertility of the Oceans. in *Encyclopedia of Oceanography*, Rhodes W. Fairbridge, Ed. Dowden, Hutchinson & Ross, Stroudsburg, Pa.
- Nielsen, E. Steemann (1952). Production of Organic Matter in the Sea. *Nature*. 169: 956.
- Nielsen, E. Steemann (1966). Fertility of the Oceans, Productivity, Definition and Measurement, in *The Sea*, Vol. 2, N. M. Hill, Ed. Wiley—Interscience, New York.
- Ray, Peter Martin (1966). *The Living Plant*. Holt, Rinehart & Winston, New York.
- Raymont, J. E. G. (1963). *Plankton and Productivity in the Oceans*. Macmillan, New York.
- Reid, George K. (1961). *Ecology in Inland Waters and Estuaries*. Van Nostrand, New York.

Riley, G. A. (1944). The Carbon Metabolism and Photosynthetic Efficiency of the Earth as a Whole. *American Scientist* 32: 129.

Rounsefell, George A. (1953), *Fishery Science, Its Methods and Applications*, Wiley, New York.

Sienko, Michell J. and Robert A. Plane (1957). *Chemistry*, McGraw—Hill, New York.

Spotte, Stephen H. (1970). *Fish and Invertebrate Culture; Water Management in Closed Systems*. Wiley—Interscience, New York.

Strickland, J. D. H. (1960). Measuring the Production of Marine Phytoplankton, Bulletin 122. Fisheries Research Board of Canada, Ottawa, p. 172.

Sverdrup, H. U., Martin W. Johnson, and Richard H. Fleming (1942). *The Oceans. Their Physics, Chemistry and General Biology*. Prentice—Hall, Englewood Cliffs, N. J.

Encyclopedia of Oceanography, Rhodes W. Fairbridge, Ed. (1966). Dowden, Hutchinson & Ross, Stroudsburg, Pa.

Turekian, K. K. (1969). Hydrosphere Distribution of Elements, in 1969 Yearbook of Science and Technology, McGraw—Hill, New York.

Wald, George (1959). *Life and Light*. Reprint from *Scientific American*, October, Freeman, San Francisco.

Часть II. УСТРОЙСТВО СИСТЕМ ДЛЯ КУЛЬТИВИРОВАНИЯ ГИДРОБИОНТОВ

Глава 7. ВИДЫ СИСТЕМ

До сих пор мы рассматривали природные водные системы и их характеристики, важные для жизнедеятельности водных организмов. Природные системы функционируют без вмешательства человека. В действительности, загрязняя среду или вмешиваясь каким-либо другим образом, человек может нарушить, ускорить, замедлить или даже остановить некоторые процессы, протекающие в системе. Деятельность человека обычно отражается только на одном или нескольких процессах системы. Если масштабы этой деятельности превышают восстановительные способности природной системы, вся система может быть разрушена из-за недостатка или избытка некоторых компонентов, участвующих в нормальном функционировании системы. Примером отрицательного антропогенного влияния может служить оз. Эри: сброс в озеро больших количеств химикатов, веществ с высоким химическим потреблением кислорода (ХПК) и других токсикантов превысил возможности самоочищения природной системы.

В природной системе может циркулировать только определенное количество каждого компонента. Например, предположим, что большой рыбоперерабатывающий комбинат спускает свои отходы в небольшую, протекающую поблизости речку. Сточные воды содержат отходы рыбы, соль, кровь, а в воде присутствуют хлор и детергенты. Для упрощения рассмотрим только влияние рыбных отходов. В реке рыбные отходы разлагаются бактериями. С увеличением количества рыбных отходов численность бактерий возрастает. Бактериям для дыхания необходим кислород, что приводит к снижению его концентрации в воде. Если концентрация кислорода не опускается ниже 3—5 мг/л, природная система функционирует нормально, компенсируя биохимическое потребление кислорода (БПК). К сожалению, такая компенсация самой системой не беспредельна. Если бактерии размножаются настолько, что содержание кислорода в воде становится ниже 3 мг/л, рыба в реке может погибнуть. При этом количество бактерий еще больше возрастает, а содержание кислорода в воде уменьшается. Отсутствие в воде кислорода приводит к увеличению численности анаэробных организмов и накоплению метана и сероводорода. Оба эти газа токсичны. Таким образом, избыток одного компонента в системе, например пищи для бактерий, способствует чрезмерному увеличению

другого компонента, т. е. численности бактерий. Это в свою очередь вызывает дефицит другого компонента системы — кислорода, что влечет за собой гибель рыб и размножение бактерий. В результате такой необходимый компонент системы, как растворенный в воде кислород, может быть полностью исчерпан, и система распадается из-за отсутствия одного из ее звеньев.

Основным преимуществом природных систем является их сбалансированность и цикличность. Циклическая природа этих систем исключает такие проблемы, как накопление продуктов метаболизма и остатков пищи, поскольку продукты обмена одного звена системы служат пищей для другого. Однако природные системы обычно функционируют чрезвычайно медленно, и продукция, пригодная для человека, довольно низка. В связи с этим желательно было бы увеличить продуктивность систем, не нарушая принципов их действия.

Существует несколько путей увеличения продуктивности водных систем, которые бывают трех типов: открытые, замкнутые и полужамкнутые. В открытых системах продукцию получают в естественном водоеме. В полужамкнутых системах вода из природного водоема поступает в систему после предварительной обработки или без нее и возвращается в водоем, пройдя по системе всего лишь раз. В замкнутую систему рабочая жидкость (как правило, вода) подается один раз и больше не заменяется или заменяется через значительные интервалы времени. Например, культивирование устриц с плотов производится в открытой системе. Если устрицы культивируются в питомнике, вода закачивается насосом из реки, проходит через питомник один раз и возвращается в реку, то это — полужамкнутая система. Домашний аквариум — это замкнутая система.

Каждая из трех систем имеет свои достоинства и недостатки, которые в той или иной степени проявляются во время ее работы. Перед автором стояла задача — указать на положительные и отрицательные стороны работы систем каждого типа с тем, чтобы читатель мог выбрать более рациональный и наиболее приемлемый в каждом конкретном случае тип системы.

ОТКРЫТЫЕ СИСТЕМЫ

Открытые системы известны очень давно и до сих пор являются наиболее распространенными из-за низкой стоимости и простоты обслуживания. Однако для управления более сложными открытыми системами необходим определенный уровень знаний, а капитальные затраты на такие сооружения могут быть довольно значительными.

Самая простая открытая система природная. Пока не наступит перелом, природа сама управляет системой. Затраты на получение продукции определяются расходами на облов, транспортировку и обработку улова. В природных системах расходы на облов и обработку улова выше, чем в системах для культивирования, пос-

кольку в первом случае в стоимость продукции входят затраты на доставку улова в порт из района промысла, а также на поиск рыбы. Разнокачественность и разноразмерность пойманной в естественных условиях рыбы увеличивают затраты на ее обработку. До тех пор, пока численность людей, занятых сбором какого-либо объекта (например, устриц), в какой-либо географической зоне ограничена, прибыли будут высокими для этого небольшого круга людей. Себестоимость получаемой продукции будет низкой, а ограниченное количество получаемой продукции будет пользоваться повышенным спросом при сравнительно высокой цене. Если численность населения, занятого промыслом в определенной географической зоне, резко возрастет, запасы могут оказаться подорванными. Это происходит в том случае, если величина вылова превышает естественное воспроизводство. Восстановление подорванных запасов происходит очень медленно даже при резком сокращении промысла, что объясняется ограниченными воспроизводительными способностями оставшихся в живых взрослых особей. При продолжающемся интенсивном промысле вид может полностью исчезнуть.

Существует два пути сохранения естественной ихтиофауны: регулирование промысла и воспроизводство промысловых ресурсов. К законодательным мерам регулирования промысла относятся: ограничение числа лиц, которым разрешен лов, и эффективности орудий лова, сокращение продолжительности промысла, ограничение индивидуального вылова или их комбинации. Если число людей, занятых на промысле, невелико, то они получают высокие прибыли, а выбывшие из промысла вынуждены менять место жительства и работу. Введение системы продажи лицензий в качестве фактора, лимитирующего вылов, может быть частичным решением проблемы.

Высокая стоимость лицензий делает промысел невыгодным для малоквалифицированных рыбаков и вызывает недовольство среди удачливых, но не обладающих достаточными средствами для расширения дела рыбаков. Это также приводит к сокращению числа рыбаков, частично занятых в промысле, если только для них не вводятся специальные льготы. Установление квоты вылова на одного рыбака или на одну лодку стимулирует использование неэффективных орудий и способов лова. Поскольку неэффективные методы и орудия лова требуют больших затрат (труда, времени и т. д.), то при капиталистическом способе производства это ведет к увеличению себестоимости продукции и розничных цен на конечный продукт. Сохранение рыбных запасов путем ограничения промыслового усилия дает тот же результат, что и установление квоты вылова. Узаконенное применение определенных типов орудий лова, пусть даже и эффективных, приводит к застою в развитии техники рыболовства, так как новые орудия лова все равно нельзя использовать. Таким образом, эти способы охраны запасов также ставят рыбную промышленность в неблагоприятное положение по сравнению с другими отраслями хозяйства.

Тем не менее ограничение типов орудий лова, установление квоты вылова, числа рыбаков и сезонов промысла имеет и свои положительные стороны. Несмотря на то что при установлении некоторых из перечисленных ограничений промысел может оказаться неэффективным, в промысле участвует больше рыбаков, чем до введения ограничений. Если нет возможности занять людей другой работой, лучше доплачивать им за неэффективный промысел, чем платить пособие по безработице. Тем более это выгоднее для самого населения, которое в противном случае вынуждено было бы менять место жительства. Те, кто принимает решения такого рода, должны осознавать, что неэффективность одной какой-либо отрасли хозяйства ведет к неэффективности другой. Общий жизненный уровень населения страны, несомненно, зависит от эффективности использования и оборачиваемости внутренних ресурсов.

Приведенное ниже обсуждение свидетельствует о том, что наилучший метод — тот, который позволяет повысить продуктивность до почти полного насыщения рынка продукцией. Существует несколько способов увеличения продуктивности открытых систем.

Защита от хищников. Одним из наиболее распространенных и успешных методов увеличения продукции является борьба с хищниками. Для этого используют различного рода ограждения: воздушные завесы, сетные ограждения, экраны и дамбы. Обычно защитную сетку устанавливают у входа в залив или отгораживают его часть залива. Для удаления нежелательных организмов из отгороженного участка используют химические или какие-либо другие ядовитые вещества. После этого отгороженный участок заселяют культивируемыми организмами, а ограждения предотвращают попадание туда хищников.

Время от времени для дополнительной защиты от хищников вдоль ограждения можно вносить пестициды. Ползающие донные хищники, стремящиеся проникнуть внутрь отгороженного участка водоема, поглощают летальные дозы пестицидов и гибнут. Однако при этом возникает проблема возможного отравления пестицидами культивируемых организмов, а также загрязнения близлежащих участков. Еще один метод борьбы с хищниками — изменение структуры дна. Например, для защиты молоди моллюсков от крабов дно можно засыпать гравием.

При культивировании устриц борьбу с хищниками ведут несколькими способами. От морских звезд — основных врагов устриц — избавляются, протаскивая по дну драгу в виде швабры. Морские звезды в ней запутываются, их вытаскивают из воды и опускают в кипяток. Борьбу со звездами можно вести также химическими методами, разбрасывая негашеную известь над устричными банками. Частицы негашеной извести, опускаясь на дно, попадают на нежные дыхательные мембраны морских звезд и, проникая внутрь, вызывают их гибель.

Для регулирования численности личинок миноги в Великих озерах используют электрические ловушки и селективно действующие

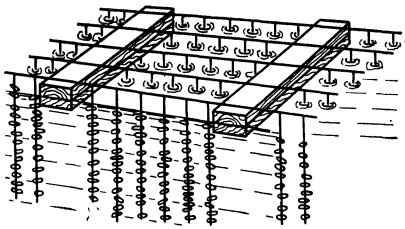


Рис. 7.1. Культивирование моллюсков с плотов

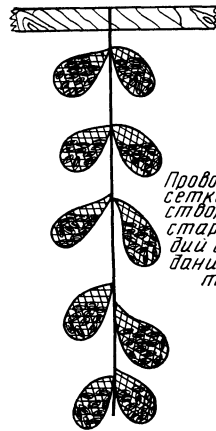


Рис. 7.2. Проволочные сетки для сбора спата устриц

пестициды. Однако проведение таких крупномасштабных мероприятий под силу только государственным учреждениям.

Культивирование беспозвоночных у дна. Культивирование беспозвоночных у дна осуществляется разными способами. При этом основной целью является выращивание прикрепленных форм во всей толще воды. Использование всего объема воды для выращивания таких организмов, как устрицы и мидии, позволяет значительно повысить продуктивность с единицы площади поверхности.

Способ заключается в выращивании организмов в подвешенном состоянии с плотов или любых других устройств, закрепленных в дне. При культивировании моллюсков в подвешенном состоянии (рис. 7.1) используют заякоренные плоты. Они представляют собой полистироловую раму, или пустые бочки, поперек которых кладут деревянные брусья размером 5×10 см. Поплавки и брусья скрепляются вместе, и получается плот. Размеры плотов варьируют, но, как правило, они составляют 4×9 м. В створках от старых раковин делают отверстия для нанизывания их на веревки с промежутком 2—10 см. Между каждой парой створок нанизывают перегородки из пластмассы, бамбука или другого материала. Длина веревок определяется глубиной в том месте, где они подвешиваются, или, если глубина большая, прочностью веревок. Затем веревки прикрепляют к поперечным брусьям плота. Число веревок, подвешиваемых к одному плоту, зависит от многих параметров, например, скорости приливо-отливных течений, наличия корма в воде, величины предполагаемых потерь. Поскольку эти плоты используются обычно для культивирования двустворчатых моллюсков, их выставляют в местах массового оседания личинок и оставляют там до того момента, когда на створки осядет достаточно спата. Если осевших личинок слишком много, веревки поднимают и лишнюю молодь со створок удаляют для лучшего роста оставшихся. Если район оседания личинок непригоден для роста осевшей молоди, плоты переводят в другой район. Такой метод позволяет эффективно использовать как районы с интенсивным оседанием

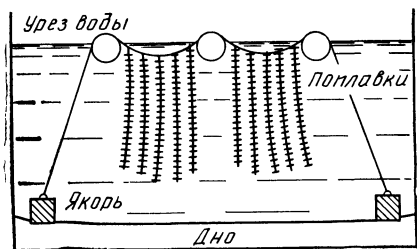


Рис. 7.3. Культивирование моллюсков на ярусах

применяемый в более открытых водах, — культивирование на «ярусах». Поплавки крепят вдоль каната или троса с промежутками (рис. 7.3), а поплавки, расположенные по краям «яруса», прочно заякоривают. Такой тяжелый «ярус» подвешивают горизонтально между поплавками, а веревки со створками подвешивают вертикально к «ярусам». По мере роста моллюсков и утяжеления яруса поплавки стремятся сблизиться, поэтому крайние поплавки необходимо прочно заякоривать.

Культивирование на установках гундэрного * типа (рис. 7.4) — еще один метод, применяемый в разных районах культивирования моллюсков у дна. Он заключается в том, что к сваям, забитым в дно, прикрепляются просмоленные канаты (Iversen, 1968). На канатах сначала оседает спат, а потом развиваются и растут до половой зрелости моллюски. На последнем году выращивания моллюсков можно помещать в металлические лотки.

Культивирование на лотках (рис. 7.5.) также применяется при выращивании моллюсков у дна в открытых системах. Моллюсков помещают в сетчатые корзины. Они могут быть сделаны из рыболовных сетей, проволоки, пластмассы или любого другого материала. Корзины подвешивают в воде и укрепляют с помощью вбитых в дно свай или подвешивают под плотами. Обрастание таких приспособлений — очень серьезная проблема, особенно если сетка засоряется и тем самым ограничивает поток воды через лотки. Уменьшение проточности замедляет рост моллюсков из-за не-

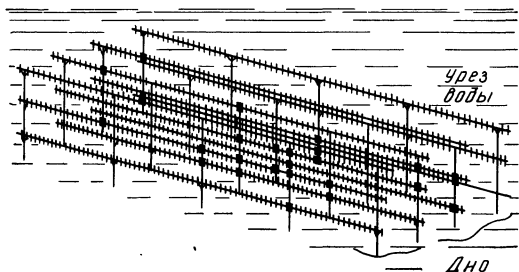


Рис. 7.4. Культивирование моллюсков на гундерах

* Гундэры — сваи, забитые в дно, между которыми натянуты канаты. — Прим. ред.

достатка кислорода и пищи, с одной стороны, и увеличения концентрации продуктов обмена — с другой.

Подвешенные в воде садки используют также для выращивания рыбы. В таких системах рыбу (например, сомика-кошку) помещают в плавучие садки. Часто, особенно при выращивании сомика-кошки, плотность посадки рыб высокая, поэтому рыб в садках обязательно подкармливают. При уплотненных посадках возникает проблема дефицита кислорода, за исключением тех случаев, когда скорость потока воды через садки достаточно велика для обеспечения необходимого содержания в ней кислорода и удаления продуктов обмена.

Повышенная продуктивность таких систем достигается, во-первых, в результате использования всей толщи воды, а не только площади поверхности дна, а во-вторых, веревки подвешиваются к плотам таким образом, что между их концами и дном остается еще 30—60 см, что делает объекты культивирования доступными для хищников. В-третьих, такой метод выращивания позволяет полнее использовать богатые планктоном слои воды. Планктон почти всегда скапливается в верхних слоях воды, а поскольку планктон — основная пища для многих организмов (например, устриц), обитающих в открытых системах подвешенного типа, то темп роста их там более высокий. При любом типе культивирования организмов в подвесных устройствах открытых систем существует несколько проблем. Волны могут разрушить или повредить подвесные устройства, например плоты. Движение канатов под действием волн может повредить раковины старых мидий, прикрепленные к канатам, оторвать канаты и тем самым уничтожить всю продукцию. Движение канатов затрудняет прикрепление спата к створкам мидий. Устрицы часто опадают и гибнут. Иногда опадает весь урожай устриц.

Серьезной проблемой является также обрастание установок с моллюсками нежелательными растениями и животными. Например, при культивировании устриц на канатах в Южной Каролине отношение веса обрастания к весу живых устриц составляет от 2:1 до 4:1 (Marshall, 1970). Канаты должны быть достаточно прочными, чтобы выдержать дополнительный вес обрастаний. Кроме того, обрастание снижает проточность воды через моллюсков, ограничивая поступление кислорода и пищи. Обрастания конкурируют с культивируемыми моллюсками за площадь, пищу и кислород и иногда существенно влияют на урожайность. Интенсивность обрастания зависит от района, времени года и качества

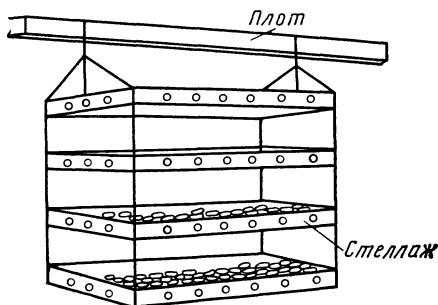


Рис 7.5. Культивирование моллюсков на стеллажах, прикрепленных к плотам

воды в открытой системе (например, пресная или соленая). В пресноводной системе проблема обрастания обычно не столь остра. В солоноватоводных и морских открытых системах интенсивность обрастания зависит от района. В некоторых районах она настолько велика, что культивировать моллюсков в подвесных установках невозможно. Тем не менее при современном уровне знаний надежный прогноз интенсивности обрастания для какого-либо водоема дать пока невозможно. В общем случае в более теплых высокопродуктивных водах интенсивность обрастания выше, чем в более холодных и менее продуктивных. Интенсивность обрастания варьирует по сезонам поэтому ее можно предсказать, зная наиболее распространенные для данного района организмы-обрастатели и наблюдая за их жизненным циклом. Наилучший метод изучения — экспериментальный. Предполагаемый для культивирования объект помещают в воду того района, где намечено проводить выращивание, и определяют степень обрастания. Данные за несколько лет более надежны, но некоторые приблизительные подсчеты можно сделать и на основании материалов одного года наблюдений.

При культивировании на плотках, гундерах и в лотках возникает еще одна проблема — загрязнение воды продуктами обмена культивируемых организмов. Если метаболиты не разносятся течением, они откладываются на дне, где начинаются анаэробные процессы. Выделяемый в воду сероводород может вызвать гибель культивируемых организмов. Такой случай произошел в Чесапикском заливе при культивировании устриц (Shaw, 1971).

Удобрение водоемов. Продуктивность открытых систем можно значительно повысить путем внесения органических и неорганических удобрений. Органические удобрения (морские водоросли, навоз и пр.) можно использовать только в особых случаях или в ограниченных количествах. Органические удобрения должны быть разложены до неорганических веществ, а для этого необходим кислород. При отсутствии постоянного контроля в воде будет наблюдаться дефицит кислорода. При внесении неорганических удобрений непосредственного уменьшения содержания кислорода не происходит, поскольку они не требуют большого количества кислорода. Однако неорганические удобрения способны вызвать «цветение» водорослей, что также может привести к дефициту кислорода в ночное время или при отмирании водорослей.

Помимо того, что органические удобрения могут вызвать заморы, у них есть еще и другие недостатки. В качестве удобрений обычно используют навоз, который при внесении в пруд с рыбой может вызывать заболевания у населения. В США существуют ограничения на использование навоза для удобрения прудов, где выращивают столовую рыбу.

Кроме того с органическими удобрениями в пруд могут попасть вещества, которые способны придать выращиваемой рыбе неприятный привкус.

Большинство неорганических удобрений содержат азот, фос-

фор, калий в различных соотношениях. Поскольку один из этих элементов обычно лимитирует рост фитопланктона, внесение удобрений часто вызывает быстрый рост водорослей. В результате роста водорослей — основы пищевой цепи — возрастает продуктивность всей системы. Однако при перенасыщении системы минеральными удобрениями может возникнуть дефицит кислорода, особенно в облачные дни и ночью. Поскольку в продаже имеются удобрения с различным содержанием каждого из этих трех элементов, то состав и количество удобрений определяют по результатам анализа воды в лабораторных условиях.

Внесение удобрений в открытые участки океана, большие реки и озера следует производить с большой осторожностью. Большая часть питательных веществ может быть потеряна из-за диффузии и переноса течениями. В результате применение дорогостоящих удобрений окажется малоэффективным или бесполезным. Вынос питательных веществ также можно рассматривать как один из вариантов загрязнения среды, если они выходят из зоны, где проводится культивирование гидробионтов.

Борьба с заболеваниями гидробионтов. В открытых системах бороться с заболеваниями очень трудно, если вообще возможно. Это один из основных недостатков открытых систем. Однако даже в открытых системах некоторые мероприятия по борьбе с болезнями могут быть эффективными.

Соленость воды ограничивает выживаемость некоторых возбудителей болезней. Классическим примером может служить заболевание MSX устриц *. При солености менее 15 ‰ MSX не живут, а на устриц она не влияет. Помещение устриц в воду соленостью выше 15 ‰ дает положительный эффект только в том случае, если культивируемые организмы устойчивы к широкому диапазону солености; кроме того, такую процедуру нужно проводить очень осторожно, чтобы выбрать наиболее подходящий диапазон солености.

В некоторых случаях пестициды могут способствовать борьбе с заболеваниями. Однако правительственные меры по контролю за качеством продуктов питания и медикаментов в значительной степени ограничивают использование пестицидов в борьбе с болезнями культивируемых организмов.

Управление открытыми системами. Управление открытыми системами зависит от их типа и желаемого выхода продукции. Иногда система действует без вмешательства человека, и для обслуживания такой системы особых знаний не требуется. Если целью является получение максимальной продукции, обслуживание такой системой весьма усложняется. Между этими двумя крайними вариантами лежит ряд различных методов управления.

В естественных условиях природа сама управляет системой. Единственное, что остается сделать человеку, — это обловить во-

* MSX — заболевание американских устриц, вызываемое паразитом гаплоспори-
дий. — *Прим. ред.*

доем и переработать улов. Однако в природе чередование урожайных и неурожайных лет — обычное явление. Например, предположим, что создались идеальные условия для существования молоди одного поколения форели. Избыточная численность этого поколения вызовет дефицит корма, задержку роста, увеличение числа хищников и возникновение болезней. В результате смертность форели увеличится. Однако регулирование численности произойдет только после того, как проблема станет острой. Профилактические меры, например дополнительная подкормка или удаление части личинок сразу после выклева, могли бы предотвратить нехватку корма. Это предотвратило бы снижение темпа роста и позволило бы рыбе проявить полностью свой генетический потенциал. Для регулирования численности естественных запасов рыб необходимо знание их биологии, факторов окружающей среды и пределов толерантности организмов к ним; воспроизводительных способностей вида и размеров организмов, при которых происходит размножение; выживаемости молоди, кормовых организмов и их биологии, факторов, влияющих на биологию кормовых организмов, и ответных реакций кормовых организмов на изменение этих факторов; характера миграций (если таковые существуют). Кроме того, необходимо устанавливать влияние промысла на численность рыб и строго контролировать промысел данного вида.

К сожалению, такой полной информации не существует ни для одного вида. Кроме того, для достижения максимальных уловов в открытой системе помимо перечисленных необходимы еще дополнительные сведения. Осуществить на практике полный контроль за добычей какого-либо объекта очень сложно. Таким образом, в современных условиях осуществлять полный контроль в открытых системах для получения максимально устойчивого улова невозможно. Однако максимальный улов можно использовать как основную цель регулирования и стремиться к ее достижению. Несмотря на ограниченные знания открытых систем, предпринимаются попытки управлять этими системами. В будущем предстоит еще многое сделать для максимального использования открытых систем.

ПОЛУЗАМКНУТЫЕ СИСТЕМЫ

Полузамкнутые системы характеризуются тем, что в них используется природная вода, которая проходит через систему один раз. Большинство полузамкнутых систем расположено там, где их использование наиболее эффективно. Эта характерная особенность полузамкнутых систем облегчает их обслуживание.

В полузамкнутых системах параметры среды легче поддаются регулированию, чем в открытых. В частности, там можно следить за температурой, расходом воды, скоростью течения, хищниками и заболеваниями. Полностью удалить хищников и избавиться от загрязнения в полузамкнутых системах очень трудно, поскольку

в них используется природная вода. Однако в природных водах содержится фитопланктон, который может служить кормом.

Большинство полузамкнутых систем функционирует в специализированных помещениях, строительство которых требует дополнительных капитальных затрат, но зато делает работу системы независимой от метеоусловий. Повышенные капитальные затраты компенсируются высоким и однородным качеством готовой продукции. Продукция, получаемая в полузамкнутых системах, превышает продукцию открытых систем, что также компенсирует капитальные затраты. Облов таких систем производится легче, быстрее и экономичнее, чем открытых систем. Регулирование температуры позволяет контролировать товарный размер и сроки реализации продукции. Поскольку большинство культивируемых водных организмов пойкилотермные, существует довольно тесная зависимость между температурой воды, темпом роста и потреблением корма.

Наряду с преимуществами у полузамкнутых систем есть и недостатки. В полузамкнутых системах требуется больший контроль, чем в открытых, а знания в этой области пока недостаточны. В большинстве полузамкнутых систем плотности посадки культивируемых организмов выше, чем в открытых системах, что увеличивает опасность массовых заболеваний.

Для многих полузамкнутых систем требуется фильтрация и очистка воды. Ультрафиолетовое облучение и химическая обработка воды, например хлорирование, применяются для уничтожения хищников и болезнетворных организмов. Частичная очистка воды может производиться перед спуском ее в естественный водоем, особенно при высоких плотностях посадки. Очистка воды и ее фильтрация рассмотрены в следующих главах. Здесь необходимо лишь отметить, что эти процессы удорожают стоимость эксплуатации системы.

Увеличение расходов, связанных с охраной окружающей среды, должно с лихвой себя окупить, поскольку качество воды имеет решающее значение для получения высококачественной продукции. Качество отработавшей в системе и спускаемой обратно в водоем воды можно также регулировать пропусканием больших ее объемов через систему. При расчете рентабельности системы необходимо учитывать стоимость затрат на перекачивание воды.

ЗАМКНУТЫЕ СИСТЕМЫ

В замкнутых системах рабочая жидкость заливается в систему один раз и практически не заменяется или заменяется очень редко. Внутри системы жидкость циркулирует с помощью насосов или каких-либо других устройств. В закрытых системах многие параметры среды строго контролируются. Температура воды — один из критических факторов для пойкилотермных животных — может регулироваться более экономично в замкнутых системах, чем в полузамкнутых, поэтому энергетические пот-

ребности замкнутых систем меньше, чем полузамкнутых, даже при использовании большего числа насосов. Подогрев и охлаждение воды — одна из основных статей расходов в замкнутых и полузамкнутых системах.

Контроль за температурой воды и другими параметрами ускоряет рост культивируемых организмов и способствует более экономному расходованию корма. Такие системы позволяют регулировать время и сроки реализации продукции независимо от сезона. Продукция получается однородной по размерам, вкусовым качествам и внешнему виду, что облегчает ее обработку. Высокое и однородное качество продукции обеспечивает и высокую цену на нее.

В замкнутых системах вполне реально осуществлять борьбу с болезнями. Одновременно можно подвергнуть обработке большую группу организмов, не затрагивая других, которым такая обработка не нужна. Постоянное наблюдение за организмами способствует раннему выявлению заболеваний. Целесообразно также проводить и профилактические мероприятия, поскольку возможность заражения системы извне сведена к минимуму. Регулирование и поддержание на определенном уровне параметров среды снижает стресс и увеличивает сопротивляемость животных болезням. Однако высокие плотности посадки, типичные для замкнутых систем, увеличивают вероятность стресса и возникновения заболеваний. Постоянная обработка воды для предотвращения болезней в замкнутых системах экономичнее, чем в открытых или полузамкнутых.

Правильно спроектированная замкнутая система облегчает уход за культивируемыми объектами. Постоянное наблюдение, специальные приспособления и устройства облегчают зарыбление и сбор готовой продукции.

К основным недостаткам замкнутых систем относятся крупные капитальные затраты на строительство и необходимость высококвалифицированного обслуживания. Большие капитальные затраты объясняются необходимостью фильтрации воды и ее очистки, а также наличием выростных бассейнов или прудов. Оборудование для фильтрации и очистки воды предназначено для удаления из нее продуктов обмена перед повторной подачей в бассейн. В полузамкнутых системах также необходимо проводить фильтрацию перед спуском воды в природные водоемы, поэтому фильтрация воды в замкнутых системах не столь значительно удорожает их стоимость, как это может сначала показаться. В состав очистных сооружений могут входить также ультрафиолетовые установки для профилактики различных заболеваний.

В затратах на обслуживание замкнутых систем основная доля расходов приходится на работу насосов. В правильно спроектированных системах работу насосов можно свести к минимуму, но совсем исключить ее нельзя. При высоких плотностях посадки необходимо также иметь компрессоры для аэрации воды. Еще одна крупная статья расходов в замкнутых системах — это корма. В

открытых системах почти всегда используются естественные кормовые организмы. В полузамкнутых системах могут использоваться как естественные кормовые организмы, поступающие с водой, так и искусственные корма.

Для успешного культивирования гидробионтов в замкнутых системах необходимо знать их требования к параметрам окружающей среды, а также строго контролировать эти параметры. Особенно это относится к системам с высокими плотностями посадки.

Замкнутые системы имеют ряд преимуществ перед открытыми и полузамкнутыми, но в настоящее время рентабельны всего несколько промышленных установок. Открытые системы широко распространены во всем мире. Одной из модификаций природных систем является культивирование моллюсков у дна, особенно в Японии и других странах Дальнего Востока. Полузамкнутые системы широко используются в США для культивирования сомика-кошки, форели и на рыбопитомниках, особенно при получении сеголетков для спортивного рыболовства. В некоторых странах в полузамкнутых системах выращивают карпа. Рыб других видов также выращивают в полузамкнутых системах, но в более ограниченных масштабах.

На сегодняшний день реальный результат — это реальная работа открытых систем для рыб, беспозвоночных и водорослей. Полузамкнутые системы экономически выгодны для некоторых объектов и в отдельных случаях. Замкнутые системы выгодны лишь для некоторых видов, и то только при особых обстоятельствах. Повышение цен на топливо для рыболовного флота, уменьшение запасов промысловых объектов и развитие науки будут способствовать более широкому использованию полузамкнутых и замкнутых систем и снижению себестоимости их продукции.

REFERENCES

- Iversen, E. S. (1968). *Farming the Edge of the Sea*. Fishing News (Books), Ltd, London.
- Marshall, Howard L. (1970). Development and Evaluation of New Cultch Materials and Techniques for Thirte — Dimensional Oyster Culture. *Marine Technology Society Journal* 4 (1): 7—20.
- Shaw, William (1971). Personal Communication.

Глава 8. ВОДОСНАБЖЕНИЕ ПРЕДПРИЯТИЙ ПО КУЛЬТИВИРОВАНИЮ ВОДНЫХ ОРГАНИЗМОВ

Всем предприятиям по культивированию водных организмов необходима вода хорошего качества. Количество и качество подаваемой воды зависят от специфики предприятия; даже предприятия, работающие по замкнутому циклу, нуждаются в некотором количестве воды. От параметров системы водоснабжения и

качества подаваемой воды часто зависит эффективность работы предприятия. Однако как раз качество воды чаще всего недооценивается специалистами. Недооценка этого параметра — одна из наиболее серьезных ошибок, встречающихся при устройстве систем по разведению водных организмов.

КОЛИЧЕСТВО ВОДЫ

Вода на предприятиях по разведению водных организмов необходима для различных целей. Независимо от вида системы должна быть предусмотрена компенсация потерь на испарение. Потери на испарение пропорциональны температуре воды и воздуха, давлению пара, площади водной поверхности и скорости ветра. Ветер уменьшает парциальное давление водяного пара над водной поверхностью, в результате чего скорость испарения увеличивается. Кроме того, движение воздуха ускоряет испарение путем увеличения притока теплоты к поверхности испарения. Повышение температуры воды приводит к возрастанию кинетической энергии молекул, что увеличивает вероятность выхода молекулы из жидкости в атмосферу. В результате скорость испарения возрастает. Чем выше температура окружающего воздуха, тем интенсивнее испарение. При повышении температуры воздуха уменьшается вязкость жидкости и кинетическая энергия молекул становится достаточной для преодоления сил сцепления, испарение идет быстрее. Больше других факторов на скорость испарения, по-видимому, влияет величина поверхности испарения. На большинстве предприятий по разведению водных организмов используются сравнительно мелкие пруды. При этом отношение площади поверхности к объему велико и испарение оказывается весьма интенсивным относительно объема воды. Часто в хозяйствах по разведению водных организмов используются земляные дамбы с различной пористостью грунта. Независимо от типа грунта вода просачивается через него. Эти потери воды должны восполняться системой водоснабжения.

Одной из важнейших задач водоснабжения является обеспечение кислородом или регулирование его содержания в водоеме. При разведении в прудах различных водных организмов может возникнуть дефицит кислорода. Подача воды, насыщенной кислородом, может исправить положение.

Еще одной функцией системы водоснабжения является удаление отходов. Все водные организмы выделяют токсичные продукты обмена. Накапливание таких веществ в водоеме приводит к гибели гидробионтов. Поскольку большинство продуктов выделения содержится в воде в растворенном виде, поступление свежей воды в водоем способствует их выведению. Количество отходов зависит от численности водных организмов в водоеме, температуры воды, типа и количества корма и некоторых других факторов.

Количество отходов возрастает с увеличением плотности посадки, интенсивности кормления и температуры воды до тех пор,

пока дальнейшее повышение температуры не приведет к отрицательным последствиям для культивируемых организмов. При дальнейшем повышении температуры воды уровень обмена и выделение отходов будут уменьшаться. Избыточное кормление увеличивает БПК и снижает содержание кислорода в водоеме. Для обеспечения кислородом и выведения из водоема токсичных продуктов жизнедеятельности животных и остатков корма необходимы большие объемы воды.

Помимо восполнения потерь на испарение, просачивание, доставки кислорода и удаления отходов вода может понадобиться и для других целей, в частности для содержания маточного стада и обслуживания инкубационных аппаратов, для бытовых нужд и полива. При расчете объема воды, необходимой для системы, следует учитывать как существующие потребности так и возможности расширения. Избыток воды лучше, чем недостаток, так как вода в конечном счете — это среда обитания водных животных.

Потребное количество воды зависит от вида организмов, биотехники культивирования, плотности посадки и других факторов. Гриззел и др. (Grizzel et al.) (1969) рекомендуют для пруда площадью 4,25 га, в котором разводят сомика-кошку, минимальный расход воды 1000 л/мин. Потребности в воде при выращивании сеголетков чавычи представлены графически на рис. 8.1. (Burgows and Combs, 1968). Имеются также и другие данные для различных рыб в разных условиях выращивания (Liao, 1971). Обычно больше всего воды требуется открытым системам, меньше всего — замкнутым, промежуточное положение занимают системы полужамкнутого типа. Разведение рыбы в каналах, например, требует значительных расходов и объемов воды, если система работает в полужамкнутом режиме. Если такая же система работает в замкнутом режиме, замена воды производится периодически с постоянным пополнением, необходимым только для компенсации потерь.

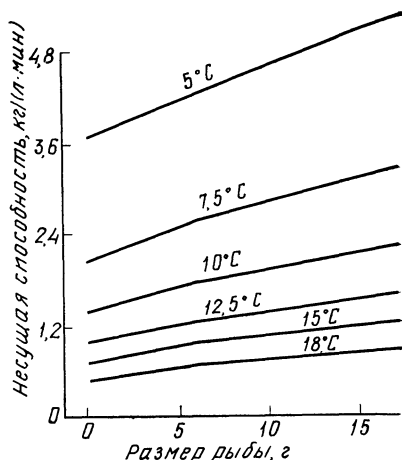


Рис. 8.1. Несущая способность насыщенной кислородом воды при нормальном уровне активности чавычи в зависимости от температуры воды и размеров рыбы (Burgows, and Combs, 1968)

КАЧЕСТВО ВОДЫ

Требования, предъявляемые к качеству воды, в каждом конкретном случае зависят от ее назначения. Например, вода для выращивания водорослей по своим качествам отличается от питьевой. Поскольку в данном случае речь идет о воде, предназначен-

ной для систем по разведению водных организмов, качество воды считается «хорошим», если оно удовлетворяет условиям поддержания жизни водных организмов и соответствует санитарным стандартам, допускающим использование полученной продукции по назначению. Согласно этому определению необработанные бытовые сточные воды могут оказаться хорошего качества для разведения в них водорослей, которые после соответствующей обработки и стерилизации используются для кормления выращиваемых водных организмов. Вполне вероятно, что эта же самая вода, содержащая *Salmonella* или другие опасные микроорганизмы, будет считаться «плохого» качества даже после третичной обработки, если ее применять для культивирования столовой рыбы.

Очевидно, необходимо дать краткое и точное определение термина «загрязнение». «Загрязнением» следует считать любые примеси, содержащиеся в воде (растворенные или взвешенные), вредные для организма (или организмов), выращиваемых в этой воде, или для потребителей организмов, выращиваемых в этой воде. В первом приведенном примере твердые примеси, содержащиеся в необработанных сточных водах, могут считаться или не считаться загрязнениями. Во втором примере загрязнителями являются патогенные микроорганизмы. При разведении водных организмов, которые утилизируют нефть, ее следует рассматривать не как загрязнитель, а скорее как питательное вещество, присутствующее в воде. Спуск в водоем отработанных теплых вод также может быть благоприятным или неблагоприятным для культивируемых объектов. Несмотря на трудности четкого определения «хорошего» качества воды, вода, предназначенная для разведения водных организмов, должна обладать определенными характеристиками. Для удобства рассмотрения этого вопроса разделим все водные организмы на три группы: животные, фотосинтезирующие растения и другие организмы.

Все водные животные нуждаются в кислороде и источнике органического питания. Требования к содержанию кислорода в воде зависят от вида организма, температуры воды и физиологического стресса, испытываемого организмом. Некоторые водные животные могут жить непродолжительное время в условиях, когда содержание кислорода в воде приближается к нулю, другие, например водные млекопитающие, погибают даже в насыщенной кислородом воде. С повышением температуры скорость обмена веществ у холоднокровных животных увеличивается, а у теплокровных снижается. При повышении температуры воды, однако, наступает такой момент, когда и скорость обмена веществ, и потребление кислорода начинают снижаться. Дальнейшее увеличение температуры приводит к тепловой гибели организмов. Хотя температура, при которой интенсивность обмена веществ и потребление кислорода максимальны, различна для разных животных, тем не менее почти для всех животных характерна зависимость потребления кислорода от температуры. Физиологический стресс, который может быть результатом загрязнения, слишком высокой темпера-

туры воды, физиологических нарушений и других условий, обычно сопровождается повышенным потреблением кислорода.

Потребности водных организмов в питательных веществах значительно колеблются в зависимости от характера потребляемой ими пищи. Набор основных питательных веществ отличается удивительным постоянством независимо от вида животного, однако форма, в которой эти вещества утилизируются, исключительно разнообразна. Поскольку животные не способны фотосинтезировать, они вынуждены извлекать такие ограниченные вещества, как белки, жиры и углеводы, или вещества, из которых они впоследствии получают эти соединения, либо из воды, либо из содержащихся в ней взвесей. Эти вещества влияют на качество воды, так как взвешены или растворены в ней. Витамины, минеральные и другие вещества также необходимы животным. Способность животных к синтезу аминокислот неодинакова, поэтому и требования, предъявляемые к набору аминокислот в рационе животных, различаются так же, как и степень загрязнения воды остатками корма. Потребности в витаминах и минеральных веществах по количеству и по составу также неодинаковы у разных животных. К сожалению, многие проблемы, касающиеся потребностей водных организмов в питательных веществах и влияния различных кормов на качество воды, остаются пока неизученными.

В настоящее время пищевые потребности полностью изучены лишь для очень немногих видов водных животных, к их числу относится форель. В понятие «хорошая вода» входят температура, соленость и жесткость, благоприятные для жизнедеятельности культивируемого организма. Кроме того, в «хорошей» воде не должно содержаться слишком много патогенных для выращиваемых видов микроорганизмов.

Для культивирования водных растений также необходимы определенная температура, или температурный диапазон, соленость, жесткость и концентрация патогенных организмов. Фотосинтезирующие водные растения должны получать кислород в условиях слабой освещенности, так как кислорода, вырабатываемого в процессе фотосинтеза, недостаточно для нормального обмена веществ. Загрязнение воды должно быть также ниже уровня токсичности для водных растений.

Фотосинтезирующим водным растениям в отличие от водных животных необходимы углекислый газ, свет и питательные вещества. Фотосинтезирующие растения извлекают углерод из углекислого газа для построения органических соединений, в то время как животные выделяют углекислый газ. Свет используется растениями в качестве энергии для построения органических соединений из углерода (из углекислого газа) и неорганических питательных веществ. Таким образом, водная среда должна обеспечивать фотосинтезирующие растения углекислым газом и неорганическими питательными веществами. Свет, необходимый растениям, должен проникать сквозь воду. Если в воде содержится много загрязнений, освещенность, а следовательно, и продукция,

снижаются. К числу неорганических веществ, в которых нуждаются растения, относятся азот, фосфор, калий, углерод, водород, кислород, кальций, сера, магний, железо, марганец, цинк, бор, медь и молибден. Некоторым растениям необходимы также натрий, алюминий, кремний, хлор, галлий и кобальт, есть и такая группа растений, которая выживает только при условии содержания в воде в свободной форме витаминов и других соединений.

Потребности третьей группы организмов мало отличаются от потребностей фотосинтезирующих растений и животных. К этой группе относятся в основном бактерии, грибы и симбиотические организмы. Некоторые из них утилизируют энергию, выделяющуюся в результате неорганических химических реакций (например, серные бактерии), а другие используют органические соединения, растворенные или взвешенные в воде или осадках. Многим организмам этой группы необходимы неорганические вещества, которые должны содержаться в воде, предназначенной для их выращивания; для жизнедеятельности других в воде должны присутствовать свободные органические соединения, например аминокислоты. Одни организмы способны выживать в широком диапазоне температур и солености воды, другие переносят только весьма незначительные колебания этих параметров.

Таким образом, понятие качества воды является относительным, смысл его зависит от цели, для которой предназначена вода. Тем не менее вода, предназначенная для снабжения предприятий по разведению водных организмов, должна отвечать определенным требованиям. Содержание кислорода, температура, соленость и жесткость воды должны быть оптимальными или близкими к оптимальным значениям для выращиваемых видов. Вода, предназначенная для снабжения систем по разведению водных организмов, должна быть свободна от загрязнений, особенно токсичными организмами, остатков несъеденного корма, химических веществ и растворенных в воде токсичных газов.

ИСТОЧНИКИ ВОДЫ

Источники воды для предприятий по разведению водных организмов могут быть подземные и поверхностные. Каждый из них имеет свои преимущества и недостатки, а также отличительные особенности, которые могут ограничить их применение для хозяйств аквакультуры.

Подземные воды. Эти воды, как правило, свободны от загрязнений, хотя иногда несут с собой ядовитые газы, которые могут оказаться токсичными для водных организмов. К числу таких нежелательных газов относятся широко распространенные сероводород и метан. Химический состав подземных вод в значительной степени зависит от характера пород, окружающих данный подземный источник. Подземные воды известняковых пород характеризуются жесткостью, в них содержится много растворенного кальция, в трубах эти воды образуют отложения, но относительно

некоррозионны. Подземные воды гранитных пород обладают сравнительно невысокой жесткостью, в них содержится меньше минеральных веществ, они характеризуются довольно высоким содержанием свободной углекислоты и весьма коррозионны (Water Quality and Treatment, 1951). Основным недостатком большинства подземных источников является низкое содержание кислорода.

Для подземных источников весьма характерна постоянная температура в течение всего года. В источниках неглубокого залегания температура воды приближается к среднегодовой температуре атмосферного воздуха для данного района. На глубине свыше 15,24 м температура воды подземных источников возрастает примерно на 1°С на каждые 32 м глубины.

Существует три вида источников подземных вод: родники, депрессии и скважины. Скважины в свою очередь делятся на напорные (артезианские) и колодцы, воду из которых необходимо выкачивать. На рис. 8.2 показаны различные виды водных источников. В скважины вода поступает через водопроницаемый слой породы, песка или гравия, расположенный ниже поверхности земли. Эти водопроницаемые слои называются водоносными пластами. Скважина иногда питается водой из подземного ручья, но такие случаи сравнительно редки.

Родники. Родники появляются там, где водоносный слой выходит на поверхность, либо в тех случаях, когда трещина или другое нарушение верхнего слоя (см. рис. 8.2) над заключенным в грунте водоносным пластом позволяет воде выйти на поверхность. Вода родников выходит на поверхность либо в одной какой-либо точке — единичный источник, либо просачивается сразу на большом участке поверхности. Большинство родников с достаточным для предприятий по разведению водных организмов расходом относится к единичному типу, такие родники питают довольно крупные ручьи.

Родники обладают всеми преимуществами, свойственными грунтовым источникам, они дают воду высокого качества и постоянной температуры; кроме того, для ее подъема на поверхность не требуются насосы. Поскольку стоимость перекачивания может составлять значительную часть производственных затрат, это преимущество весьма существенно, так как позволяет сократить эксплуатационные расходы. В воде родников, как и в воде других

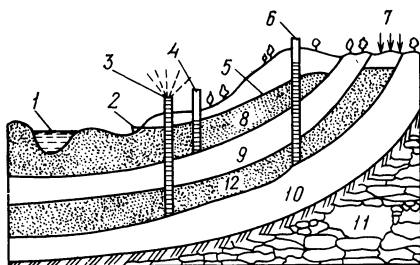


Рис. 8.2. Подземные и наземные источники поверхностных вод:

1 — поверхностный водоток или пруд; 2 — родник; 3 — свободно истекающие артезианские скважины; 4 — скважина на уровне грунтовых вод; 5 — уровень грунтовых вод; 6 — скважины, требующие откачивания воды с помощью насосов; 7 — водосборная площадь для артезианского водоносного горизонта; 8 — водоносный горизонт грунтовых вод; 9 — верхний водоупорный слой; 10 — нижний водоупорный слой; 11 — твердые породы; 12 — артезианский водоносный горизонт

подземных источников, обычно содержится мало кислорода. К оценке расхода родников в засушливый период следует подходить с осторожностью, так как в это время родники, особенно небольшие, дают значительно меньше воды. Использование таких родников в качестве источников воды для хозяйств аквакультуры необходимо тщательно продумать.

Источник, предназначенный для водоснабжения предприятия аквакультуры, должен быть предварительно подготовлен для отбора воды. Способ подготовки зависит от типа источника и места его расположения, топографии данной местности, характера грунта и некоторых других факторов. Если родник имеет вид ручья, может понадобиться совсем небольшая подготовка, в этом случае иногда вообще не нужно никаких строительных работ. Отклонение либо разделение ручья сразу же после выхода на поверхность может оказаться совершенно достаточным.

Если родник небольшой по величине, необходимо ниже по течению соорудить запруду для сбора воды или для защиты от загрязнений. Эта запруда должна быть сделана из водонепроницаемого материала, например бетона или пластмассы, и перекрывать ручей таким образом, чтобы верхний бьеф был выше поверхности земли, а нижний — несколько ниже верхней части первого водонепроницаемого слоя почвы, расположенного ниже уровня земной поверхности. Длина запруды может быть различной в зависимости от местных условий, но всегда не менее 1,2 м. В теле запруды обычно делают отверстие для сброса воды. Для сбора воды после запруды укладывают трубу, которая отводит воду в резервуар-накопитель либо, если родник достаточно велик, непосредственно к месту использования. Иногда бывает необходима обводная труба для отвода избытка воды.

Депрессии уровня грунтовых вод. Вода из расположенных ниже уровня грунтовых вод депрессий доступна лишь в некоторых районах, и целесообразность использования ее для предприятия по разведению водных организмов необходимо серьезно продумать. Для подъема такой воды на поверхность насосы обычно не требуются; вода, как правило, удовлетворяет требованиям предприятий по разведению водных организмов, несмотря на довольно низкое содержание кислорода. Однако в засушливый сезон расход также резко сокращается.

Чтобы подойти к грунтовым водам, необходимо вскрыть почву экскаватором в том месте, где уровень грунтовых вод подходит ближе всего к поверхности — несколько сантиметров или метров ниже уровня почвы. По мере удаления грунта образуется котлован, который постепенно заполняется просачивающейся в него водой. Уровень воды в котловане будет подниматься до тех пор, пока не сравняется с уровнем грунтовых вод.

Недостатков у такого источника водоснабжения очень много. Вода в котловане находится ниже уровня земной поверхности, причем такие водоемы обычно сооружают в местностях с равнинным рельефом. Циркуляция воды в водоеме почти отсутствует.

При низком содержании кислорода недостаточность циркуляции может привести к значительному дефициту кислорода. В засушливые периоды года уровень грунтовых вод может понизиться, что приведет к обмелению водоема. Единственным способом чистки этих водоемов является выкачивание воды насосами. Такие источники редко применяются для культивирования объектов с высокой плотностью посадки из-за накопления продуктов обмена и низкого содержания кислорода.

Скважины. За исключением родников, скважины являются самыми лучшими источниками воды для предприятий по разведению водных организмов. По качеству воды скважины не уступают родникам, но родники все же предпочтительнее, так как для подъема воды из скважин требуются насосы, что увеличивает эксплуатационные расходы. Обычно в воде из скважин отсутствуют загрязнения, хотя в ней могут быть растворены нежелательные газы (например, сероводород) или химические вещества (например, железо или сера). Проходя сквозь почву, вода растворяет на своем пути множество веществ. Содержание кислорода, как правило, низкое, его можно повысить аэрацией.

Скважины могут быть трех основных типов (см. рис. 8.2). Скважина на уровне грунтовых вод, в сущности, представляет собой колодец, нижний конец которого находится внутри водоносного слоя, расположенного ниже уровня грунтовых вод. Для забора воды из такой скважины требуются насосы. Производительность скважины зависит от водопроницаемости водоносного слоя и его толщины. Диаметр скважины также играет важную роль. Обычно чем больше водопроницаемость или толщина водоносного слоя, тем больше и производительность скважины. Эти скважины, иногда их называют «мелкими», более подвержены колебаниям расхода в засушливую погоду, чем глубокие.

Артезианские, или напорные, скважины — это скважины, вода из которых начинает поступать самотеком сразу после окончания бурения (см. рис. 8.2). Артезианские скважины пробуривают внутрь водоносного пласта, заключенного между двумя относительно водонепроницаемыми слоями. Площадь водосбора (т. е. площадь, где водоносный слой выходит на поверхность так, что вода может питать его) должна находиться выше выходного отверстия скважины. Вода, поступающая в водоносный пласт через площадь водосбора, течет под действием силы тяжести к скважине. Чтобы вода потекла сквозь водонепроницаемый водоносный слой, нужна энергия, именно поэтому площадь водосбора должна быть расположена выше, чем выходное отверстие артезианской скважины, и эта разница по высоте должна быть достаточной для компенсации потерь напора при протекании воды сквозь водоносный слой. Потеря напора при протекании воды сквозь водоносный слой зависит от скорости потока, проницаемости водоносного слоя и расстояния, которое должна пройти вода на своем пути сквозь водоносный слой. Таким образом, расход артезианской скважины прямо пропорционален проницаемости водоносного

слоя и обратно пропорционален скорости потока при его движении сквозь водоносный слой и расстоянию от скважины до площади водосбора:

$$v = kh/x; \quad (8.1)$$

$$Q = Av, \quad (8.2)$$

где k — водопроницаемость, м/с; x — расстояние, которое проходит вода сквозь водоносный слой, м; h — потери напора, м вод. ст.; v — скорость потока, м/с; A — площадь поперечного сечения водоносного слоя, перпендикулярная направлению движения потока, м²; Q — расход, м³/с.

Уравнение Дарси (8.1) описывает насыщенный поток, движущийся в одном направлении. В водоносном слое поток может двигаться в разных направлениях, тем не менее применение формулы Дарси для практических расчетов дает в большинстве случаев правильные результаты при условии достаточного насыщения водоносного слоя, так что принятое допущение не ограничивает область применений этой формулы. Для определения константы k пользуются экспериментальным методом, т. е. измеряют для нескольких выбранных значений глубины величины h , x , Q и A и подсчитывают k . Полученное таким образом значение k используют в дальнейших расчетах для определения потери напора при других значениях Q .

Иногда артезианскую воду приходится поднимать на поверхность насосами, это бывает, когда верхний конец скважины находится выше площади водосбора, либо разность высот между выходным отверстием скважины и площадью водосбора увеличивает расход воды через отверстие скважины настолько, что он становится больше мощности водоносного пласта, либо когда оба случая встречаются вместе.

Чем больше расход воды через артезианскую скважину, тем больше скорость движения потока и потери напора на единицу расстояния, преодолеваемого потоком в водоносном пласте. Таким образом, чтобы увеличить расход скважины, необходимо увеличить разность высот между точкой, соответствующей выходному отверстию скважины и площадью водосбора. Увеличивая таким образом расход, можно достичь некоторой точки, когда разность высот между выходным отверстием скважины и площадью водосбора оказывается недостаточной для обеспечения притока требуемого количества воды в единицу времени. Необходим еще больший перепад высот, и единственным способом его увеличения остается значительное снижение точки водозабора из скважины, в этом случае применяются насосы. Разумеется, существует максимальная производительность скважины (артезианской или любой другой). Так, артезианские скважины характеризуются максимальной производительностью, определяемой из условия свободного истечения. Она обусловлена водопроницаемостью и другими характеристиками водоносного пласта, расположением площади водосбора, соотношением высот расположения выходного

отверстия скважины и площади водосбора и другими особенностями скважины. Расход можно увеличить с помощью насосов, но это увеличение обусловлено теми же факторами, которые определяют естественный расход артезианской воды.

Артезианские напорные скважины встречаются довольно редко. Как правило, источником водоснабжения предприятий по разведению водных организмов служат скважины, оборудованные насосами.

Поверхностные источники воды. Поверхностные источники воды можно разделить на четыре группы: ручьи, озера, пруды и соленые или солоноватые водоемы. Всем этим источникам присущ общий недостаток: они доступны для любых загрязнений, поэтому пользоваться водой открытых источников следует весьма осторожно. Зато наземные источники воды богаты кислородом, что является очень существенным преимуществом для предприятий по разведению водных организмов.

Ручьи. Этим, как и другим источникам воды, присущи преимущества и недостатки, обусловленные их особенностями. Поскольку в большинстве ручьев преобладает турбулентный режим течения, они, как правило, отличаются высоким содержанием кислорода. Концентрация водородных ионов, так же как и содержание растворенных минеральных веществ, зависит от топографии, типа местности и растворимости нижнего слоя почвы в том районе, где протекает река, также от биологии реки. Географическая широта, время года, высота над уровнем моря, ширина и глубина реки и интенсивность турбулентности — все эти факторы влияют на концентрацию растворенных и взвешенных в речной воде веществ, поскольку они в первую очередь определяют количество доступной лучистой энергии. Лучистая энергия плюс достаточная концентрация растворенных в воде минеральных веществ неорганического происхождения создают условия для фотосинтеза, нормального дыхания и разложения, которые в свою очередь определяют количество органических веществ, содержащихся в воде.

Чрезвычайно важна такая характеристика ручья, как расход. Особенно если он является единственным источником водоснабжения для предприятия по разведению водных организмов. Если в течение года расход существенно колеблется, то в засушливое время года воды может не хватить, хотя именно в этот период водные организмы более всего в ней нуждаются. В засушливое время года высокие температуры увеличивают интенсивность испарения воды. В таких условиях риск гибели культивируемых организмов от высокой температуры или теплового стресса возрастает. Повышение температуры и стресс интенсифицируют процессы обмена, что в свою очередь увеличивает количество продуктов обмена, которые необходимо удалять. Температуру в водоеме можно снизить путем добавления в него более холодной воды, если температуру не удастся понизить, все равно стресс, испытываемый водными организмами, будет уменьшен в результате по-

ступления в воду дополнительного количества кислорода и снижения концентрации продуктов обмена.

При использовании ручьев в качестве источников водоснабжения возникают и другие проблемы. По сравнению с другими источниками воды ручьи отличаются более значительными суточными и годовыми колебаниями температуры. Температура воды в ручьях близка к температуре окружающего воздуха. Разность температур воды и воздуха зависит от размера ручья и ситуации, которая складывается в данный момент в его верхнем течении. Нагревание или охлаждение для поддержания необходимой температуры воды может потребовать больших затрат, так как обычно предприятия по разведению водных организмов нуждаются в больших количествах воды, а ее удельная теплоемкость высока (т. е. для нагревания или охлаждения какого-то количества воды необходимо затратить большое количество энергии).

Как и в большинстве поверхностных водных источников, в ручьях обитают различные организмы. Некоторые из них могут быть хищниками или конкурентами (особенно за пищу) для культивируемых объектов. Вместе с закачиваемой в систему водой в нее попадают некоторые из этих хищников и конкурентов, так как полное уничтожение их невозможно. Присутствие в системе организмов такого типа снижает ее общую производительность или эффективность. Вместе с тем некоторые организмы, попадающие в систему вместе с водой, могут служить пищей для культивируемых объектов. В этом случае эффективность системы повышается.

Многие ручьи несут с собой большие количества ила, который оседает в водоемах при уменьшении скорости подачи воды. Кроме того, он может нанести водным организмам прямой вред. Биологические объекты могут пострадать в результате закупоривания жабр илом. Все это нарушает обмен кислородом и углекислым газом между объектом и окружающей средой.

Загрязненные ручьи — плохой источник водоснабжения для предприятий по разведению водных организмов, так как загрязнения снижают концентрацию кислорода в воде и сами являются токсичными для водных организмов. Спуск отработанных теплых вод в ручей может оказаться полезным или вредным для культивируемых организмов.

Озера, пруды и водоемы. Вода озер, прудов и водоемов мало отличается от речной. Однако содержание кислорода в этих источниках несколько ниже, чем в реках, особенно если вода забирается ниже термоклина. Температура воды в озерах и в меньшей степени в прудах более стабильна, чем в ручьях, и успешнее прогнозируется. Сезонные колебания температуры весьма значительны, что следует принимать во внимание при проектировании предприятий по разведению водных организмов. Другие показатели качества воды, например рН и содержание растворенных и взвешенных в воде питательных веществ, также более стабильны в озерах и прудах, чем в ручьях. Чем крупнее водоем, тем меньше диапазон

колебаний и менее внезапны изменения всех параметров окружающей среды. Загрязнение воды остается серьезной проблемой, так же как и в ручьях, однако озера, пруды и водоемы по сравнению с реками избавляются от загрязнений значительно медленнее.

Иловые заносы в прудах и озерах обычно меньше, чем в ручьях, так как скорость движения воды в них меньше. В то же время риск всевозможных заболеваний в этих водах больше, чем в речных, так как вода прудов и озер, как правило, стоячая. Что касается возможности попадания хищных организмов в воду систем по разведению водных организмов, то здесь такая же ситуация, как и с ручьями.

Солоноватая и морская вода. Солоноватым и морским водам присущи все проблемы, которые возникают при использовании для предприятий по разведению водных организмов озерной и прудовой воды. Помимо этого возникают и другие трудности. Соленая вода отличается высокой коррозионной активностью, поэтому трубы, резервуары, насосы и другое оборудование, находящееся в непосредственном контакте с водой, должно изготавливаться из специальных материалов. Многие виды пластмассы, эпоксидные смолы, соединения на резиновой основе отличаются высокой коррозионной устойчивостью. Однако все материалы, применяемые в процессе культивирования водных организмов, предназначенных в пищу человека, должны удовлетворять требованиям органов здравоохранения, т. е. не быть токсичными. Некоторые смолы, резиновые и пластмассовые материалы содержат вещества, токсичные для культивируемых организмов или для человека. Эти токсичные вещества могут входить в состав как самих смол, так и различных отвердителей. В большинстве случаев можно применять нержавеющую сталь, но при этом необходимо следить, чтобы в воде не растворялся входящий в ее состав хром, который может накапливаться в культивируемых объектах. Особенно чувствительны к хрому ракообразные, так как они склонны к накоплению в своем теле тяжелых металлов. Большинство других металлов (за исключением самых дорогих) очень быстро корродирует в соленой воде. По этому показателю алюминий несколько превосходит обычные стали, но все равно оба металла корродируют в соленой воде.

Очевидно, наиболее сложной из всех проблем, возникающих при использовании на предприятиях по разведению водных организмов соленой воды (а до некоторой степени и пресной), является проблема обрастания. В жизненном цикле многих водных организмов есть стадия, когда они прикрепляются к любому предмету. Обрастание труб, резервуаров, насосов становится настоящей проблемой в хозяйствах аквакультуры.

Существует несколько способов борьбы с обрастанием, у каждого из которых есть свои недостатки. Можно добавлять в воду специальное химическое вещество, токсичное для организмов-обрастателей. Погибшие организмы затем легко вымываются водой.

Вначале в воду вносят довольно большое количество химикатов, после чего относительно долго (день, неделю или месяц) химикаты не добавляются. Через какое-то время процедуру повторяют.

Другой метод заключается в непрерывном внесении небольшого количества химикатов в воду, что исключает накопление обрастаний на элементах системы.

Химикаты, предназначенные для борьбы с обрастанием, могут оказаться токсичными не только для организмов-обрастателей, но и для культивируемых объектов. Однако, если учесть, что метод непрерывной добавки химикатов предполагает низкую концентрацию этих веществ в воде, можно полагать, что она окажется безвредной для культивируемого объекта (при условии, что его толерантность выше, чем у организмов-обрастателей). При этом, однако, необходимо убедиться, что культивируемый объект не подвергается действию сублетальной концентрации токсичных химикатов, вызывающих стресс и замедление роста.

При периодической обработке воды применяются высокие концентрации химикатов, что увеличивает токсичность среды. Однако если выбор в пользу данного метода обработки воды делается на стадии проектирования системы, можно предусмотреть обводные трубопроводы для обработанной воды. При наличии такого трубопровода обработанная вода, минуя емкости для культивируемого объекта, пропускается через систему труб и насосов. После обработки и промывки воду снова можно направлять в бассейны. Однако удалить обрастание с самих организмов и со стен бассейнов, в которых они находятся,— дело далекое не простое. Если скорость образования загрязнений сравнительно невелика, а период выращивания непродолжителен, очистку от обрастаний можно производить в периоды между заселениями. Обычно это не удается.

Еще одна проблема связана с применением химикатов для борьбы с обрастанием. Она заключается в том, что выращиваемые организмы могут поглощать химические вещества, вредные для человека (например, ртуть), что делает продукцию непригодной для употребления.

Для удаления обрастаний применяются также и механические способы. Простейший механический способ заключается в ручной очистке с применением различных скребков. Из-за высокой стоимости рабочей силы и затрудненного доступа к трубам и другим элементам системы этот способ практически малопригоден. Для очистки труб системы охлаждения на электростанциях разработано автоматическое устройство. Очистка внутренней поверхности труб производится твердыми шарами, которые вводят в воду, подаваемую в систему насосами. По окончании процесса шары собирают для повторного использования, а загрязнение выносятся водой. Такой метод можно применять и в хозяйствах аквакультуры, но если в некоторых элементах системы (например, в резервуарах) скорость невелика, это затруднит очистку. Кроме того,

шары могут нарушить нормальное питание культивируемых организмов и даже причинить им вред.

Для снижения интенсивности обрастаний можно периодически изменять температуру. Температуру воды, поступающей в систему, повышают до тех пор, пока она не превысит летальную для водных организмов, засоряющих трубы, после чего продукты разложения этих организмов вымываются водой. Этот метод редко применяется в промышленных масштабах, поскольку часть водных организмов, засоряющих элементы системы, почти всегда имеет летальную температуру, превышающую летальную температуру культивируемых объектов. Повышение температуры до уровня, достаточного для уничтожения обрастания, приводит также к гибели и самих объектов культивирования. Как и химический, тепловой метод можно применять в промежутке между заселениями. Подогрев воды обходится очень дорого, так как требует больших затрат энергии.

Для борьбы с обрастаниями можно стерилизовать воду, поступающую в систему. Два широко известных метода стерилизации основаны на применении ультрафиолетового облучения и химических препаратов. Метод химической обработки воды рассмотрен выше. Ультрафиолетовое облучение нетоксично для разводимых биологических объектов и не поглощается ими. Однако вода должна проходить через зону ультрафиолетового облучения тонким слоем. Обрастатели, оставшиеся в живых после обработки в ультрафиолетовой камере, будут по-прежнему засорять систему. Некоторые трудности связаны также с тем, что интенсивность ультрафиолетового излучателя со временем снижается. Несмотря на эти трудности, метод ультрафиолетового облучения остается одним из лучших для предприятий по разведению водных организмов. Более подробно ультрафиолетовые излучатели описаны в главе 14.

Большинство организмов-обрастателей не способны прикрепляться, если скорость воды превышает некоторое минимальное значение. Эту особенность можно использовать для предотвращения засорения многих элементов системы. Если поддерживать скорость движения воды в трубах и насосных установках на уровне, превышающем максимальную скорость, при которой водные организмы способны оседать, возможность засорения системы можно исключить. Выполнить это условие нетрудно, однако в бассейнах для выращивания поддержание высоких скоростей течения воды связано с увеличением объемов воды, поскольку площадь поперечного сечения бассейнов должна быть значительной. Увеличение объема воды повлечет за собой увеличение расходов на насосную установку. В трубах скорость увеличить очень просто, достаточно взять трубы меньшего диаметра. Однако с увеличением скорости движения в трубах возрастают потери напора на единицу длины. Соответственно увеличиваются расходы на перекачивание. Необходимость увеличения давления воды, поступающей из водного источника, с целью увеличения скорости потока вызыва-

ет постоянное возрастание эксплуатационных (на перекачивание) расходов. Высокие скорости воды в бассейнах с живыми объектами или в прудах могут причинить ущерб этим организмам. Костистые рыбы тратят больше энергии плавая в воде, движущейся с большой скоростью, при этом снижается кормовой коэффициент, так как больше энергии расходуется на обмен веществ. Однако высокие скорости воды действительно помогают бороться с обрастанием и поддерживать необходимое качество воды в зоне разведения водных организмов.

Последний способ борьбы с засорением систем по разведению водных организмов широко применяется на экспериментальных установках и на некоторых участках промышленных предприятий. Этот способ предусматривает установку двух дублирующих друг друга трубопроводов с периодическим переключением работы системы с одного на другой. Выведенная из работы система дренируется и остается в сухом виде достаточно долго, чтобы все обрастания погибли, либо система отключается и становится анаэробной для обрастаний. Благодаря периодическому переключению с одного трубопровода на другой оба могут поддерживаться в хорошем состоянии, т. е. свободными от обрастаний. В некоторых случаях стоимость такой установки становится препятствием для ее осуществления на практике.

Однако при проектировании системы следует помнить, что двоякая система трубопроводов обеспечивает не только контроль за обрастанием, но и удобство ежедневного обслуживания и ремонта.

Выростные бассейны или емкости, как правило, к двоякому трубопроводу не подключаются из-за значительного объема или площади. В то же время доступ к выростным емкостям обычно более свободен, и поэтому их легче очистить от обрастаний, чем другие участки водоподводящей системы. Например, пруды с земляным дном и берегами практически свободны от обрастаний.

Водопроводная вода. Еще одним источником воды для предприятий по разведению водных организмов является городское водоснабжение. Обычно большинство городов снабжается достаточным количеством воды, хотя в некоторых небольших городах может существовать проблема воды. Задачей городского водоснабжения является главным образом обеспечение населения питьевой водой, что предъявляет особые требования к ее качеству. Для обеспечения определенного качества воды в нее добавляют различные химические вещества, например, хлор и (или) фтор. К сожалению, эти химические вещества могут оказаться весьма нежелательными для водных организмов. Наиболее характерным примером в этом отношении является добавление хлора с целью уничтожения болезнетворных бактерий. Улучшая качество воды для человека, хлор в то же время чрезвычайно токсичен для рыбы. Таким образом, даже если системы городского водоснабжения могут обеспечить достаточное количество воды, ее качество, как правило, малоприспособимо для водных организмов. Качество

городской воды можно улучшить химическим методом, но это весьма дорогая процедура. Из-за неудовлетворительного качества воды и в связи со значительными расходами, необходимыми для достижения требуемого ее качества, системы городского водоснабжения обычно относят к неудовлетворительным источникам воды для предприятий по разведению водных организмов. Стоимость воды, полученной из этих систем, может, кроме всего прочего, оказаться достаточно высокой.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Вода, поступающая на предприятия по разведению водных организмов, должна удовлетворять количественным и качественным требованиям. Количество воды должно быть достаточным для компенсации потерь на испарение и утечки, обеспечения дыхательных потребностей водных организмов и удаления продуктов обмена. Кроме того, воды должно хватать для бытовых нужд, пожаротушения и для инкубационного цеха (если он есть).

Качество воды, предназначенной для предприятий по разведению водных организмов, должно быть довольно высоким. Температура, содержание кислорода, жесткость и соленость должны быть оптимальными, либо доведение их до этого уровня должно быть экономически приемлемым. Присутствие в воде загрязнений, так же как и нежелательных водных организмов, исключается. Содержание питательных веществ должно как можно ближе соответствовать оптимальному уровню для конкретного объекта культивирования. В случае недостаточного содержания в воде питательных веществ их можно добавлять до тех пор, пока не будут достигнуты оптимальные уровни.

Подземные источники следует считать наиболее пригодными источниками водоснабжения для предприятий по разведению водных организмов при условии, что приняты необходимые меры для обеспечения достаточной концентрации в воде кислорода. Среди подземных источников наиболее желательными являются родники, так как их использование исключает расходы на насосную установку. Весьма удобны также и скважины, однако использование воды из депрессий, расположенных ниже уровня грунтовых вод, должны предшествовать тщательные расчеты. Вода из городских систем водоснабжения должна проходить предварительную обработку перед использованием на предприятиях по разведению водных организмов. Для всех поверхностных водных источников (ручьи, озера, пруды, эстуарии, океаны) характерны более значительные временные колебания параметров окружающей среды, чем для подземных. Содержание кислорода в поверхностных источниках обычно выше, чем в подземных. Учитывая проблему загрязнения воды, предпочтение следует отдавать подземным источникам, где риск загрязнения меньше.

При использовании для хозяйств аквакультуры соленых и соленоватых источников возникают дополнительные проблемы, свя-

занные с коррозией и обрастаниями. Коррозия предотвращается тщательным выбором материалов. Для борьбы с обрастанием существует несколько способов: химическая обработка воды и ультрафиолетовое облучение, повышение температуры воды, устройство дублирующих водопроводных систем, механическая очистка либо увеличение скорости движения воды до таких значений, при которых прекращается оседание засоряющих систему водных организмов.

REFERENCES

Burrows, Roger E. and Bobby D. Combs (1968). Controlled Environments for Salmon Propagation. *Progressive Fish—Culturist* 30 (3): 123—136.

Grizzell, Roy A. Olan W. Dillon, Jr., and Edward G. Sullivan (1969). Catfish Farming. A New Farm Crop. *Farmers' Bulletin* No 2244, U. S. Department of Agriculture, Soil Conservation Service, Washington, D. C.

Liao, P. B. (1971). Water Requirements of Salmonoids. *Progressive Fish—Culturist* 33(4): 210—224.

Water Quality and Treatment, 2nd ed (1951) American Water Works Association, New York.

Глава 9. ЖИДКОСТИ

Жидкость, — это вещество, частицы которого свободно перемещаются друг относительно друга, не отделяясь от общей массы. Выражаясь техническим языком, жидкость — это тело, форма которого постоянно изменяется под действием срезающей силы. Срезающей силой называется сила, составляющая которой проходит по касательной к поверхности. Свойствами текучести могут обладать газы и жидкости. Жидкости характеризуются определенным объемом. Находясь внутри какого-либо сосуда, жидкость принимает его форму. Жидкости почти несжимаемы, поэтому их можно рассматривать как несжимаемые тела. Газы не имеют определенного объема и заполняют всю емкость, в которой хранятся. Газы относятся к числу сжимаемых веществ и во избежание серьезных ошибок их следует рассматривать с учетом этого свойства.

Вода как среда обитания водных организмов требует серьезно-го изучения. При нормальных температуре и давлении вода является жидкостью, хотя при тех же условиях она может существовать также в небольших количествах и в виде газа. Как жидкость вода может считаться несжимаемой во всех случаях, за исключением тех, когда давление превышает несколько сотен килограммов на квадратный сантиметр. Такие условия могли бы возникнуть при работах, проводимых только на больших глубинах океана. Поскольку ни в настоящее время, ни в ближайшем будущем проводить подобные работы по аквакультуре не предполагается, они не представляют интереса для специалистов данной области.

Физические свойства воды описаны в главе 2. Некоторые, наиболее важные из них перечислены ниже.

Плотность. Плотностью жидкости называется ее масса, отнесенная к объему. В системе единиц СИ она измеряется в килограммах на кубический метр (кг/м^3) и обозначается ρ .

Удельный вес. Удельным весом жидкости называется ее вес, отнесенный к объему. Единица измерения удельного веса — ньютон на кубический метр (н/м^3), обозначается γ .

Удельный вес и плотность связаны следующей зависимостью:

$$\gamma = \rho g, \quad (9.1)$$

где g — ускорение силы тяжести ($g=9,8 \text{ м/с}^2$).

Абсолютная вязкость. Свойство жидкости оказывать сопротивление относительному перемещению (сдвигу) ее частиц называется вязкостью. Абсолютная вязкость обозначается μ , а ее размерность — паскаль-секунда ($\text{Па}\cdot\text{с}$). Иногда абсолютную вязкость называют динамической вязкостью или просто вязкостью.

Кинематическая вязкость. Отношение абсолютной вязкости к плотности жидкости называется кинематической вязкостью.

$$\nu = \mu/\rho, \quad (9.2)$$

где ν — кинематическая вязкость.

Кинематическая вязкость в системе СИ измеряется в квадратных метрах в секунду ($\text{м}^2/\text{с}$).

Плотность, удельный вес, абсолютная и кинематическая вязкость для пресной и морской воды приведены в главе 2.

ГИДРОСТАТИКА

Гидростатика является разделом гидравлики, в котором изучаются законы равновесия жидкости. В основе теории гидростатики лежат два принципа: давление жидкости от поверхности до дна сосуда варьирует, и жидкость, помещенная в резервуар, оказывает силовое действие на его стенки и дно.

Гидростатическое давление жидкого тела — это сила, действующая на единицу площади. Средняя величина гидростатического давления определяется отношением силы, нормальной к поверхности, на которую она действует, к площади этой поверхности:

$$p = F/A, \quad (9.3)$$

где F — нормальная сила, действующая на поверхность A , Н; A — площадь поверхности, на которую действует сила, м^2 ; p — гидростатическое давление, Па.

Уравнение (9.3) описывает также давление в точке неподвижного жидкого тела.

С помощью уравнения (9.3) можно определить давление на дне резервуара. Изображенный на рис. 9.1 резервуар наполнен

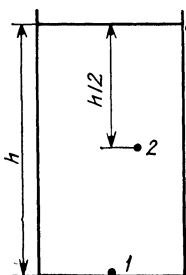
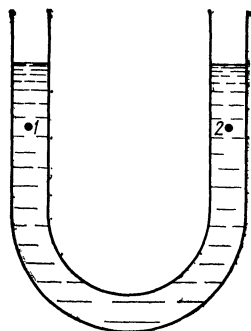


Рис. 9.1. Гидростатическое давление в различных точках столба жидкости

Рис. 9.2. Гидростатическое давление в точках жидкости, лежащих в одной горизонтальной плоскости



жидкостью с удельным весом γ . Высота столба жидкости h , площадь поперечного сечения A . Давление в точке 1 определяется уравнением (9.3). Сила, действующая на дно резервуара, равна произведению удельного веса жидкости γ на ее объем:

$$F = \gamma V. \quad (9.4)$$

Объем может быть получен умножением площади поперечного сечения столба жидкости A на его высоту h . Подстановка этих величин в формулу (9.4) дает

$$F = \gamma Ah. \quad (9.5)$$

На основании уравнений (9.5) и (9.3) можно получить следующее выражение для величины давления в нижней точке столба жидкости:

$$p = \gamma Ah/A. \quad (9.6)$$

После соответствующего сокращения уравнение (9.6) приобретает вид

$$p = \gamma h. \quad (9.7)$$

Поскольку давление — это сила, приложенная к единице площади, площадью поперечного сечения можно пренебречь

По уравнению (9.7) можно определить давление в любой точке столба жидкости. Оно будет равно произведению удельного веса жидкости на высоту столба жидкости над рассматриваемой точкой. Так, давление в точке 2 (см. рис. 9.1.)

$$p = \gamma h/2. \quad (9.8)$$

С помощью уравнения (9.7) можно показать, что во всех точках жидкости, лежащих в одной горизонтальной плоскости, давление одинаково. Если бы это было не так, жидкость потекла бы в сторону меньшего давления вместо того, чтобы занять такое положение, какое она занимает в сосуде, показанном, например, на рис. 9.2. Это действительно так, поскольку жидкости не могут оказывать сопротивление срезающей силе и любая неуравновешенная сила приводит их в движение.

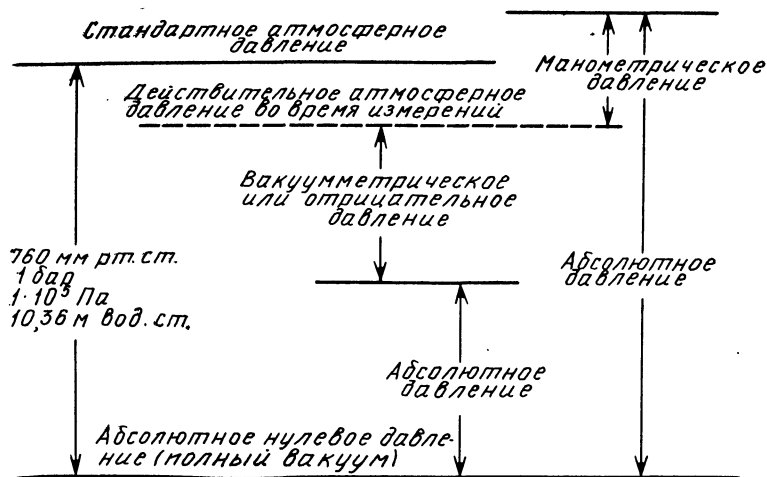


Рис. 9.3. Схема, поясняющая зависимость между абсолютным, действительным и манометрическим давлением

Абсолютное и избыточное (манометрическое) давление. Применительно к давлению, так же как и к температуре, берут за основу две критические точки отсчета. Для температурной шкалы это температура заморзания воды (0°C) и температура, при которой прекращается движение молекул — абсолютный нуль. Критические точки отсчета давления — это абсолютное нулевое давление (полный вакуум) и атмосферное давление. Соответствующие зависимости представлены на рис. 9.3. Стандартное атмосферное давление — это давление, соответствующее определенным стандартным условиям, которые принимаются при теоретических исследованиях газов. Давление, представляющее собой разность между абсолютным p_a и манометрическим p_m давлением, приблизительно равно стандартному атмосферному давлению. Уравнение для определения манометрического давления можно записать следующим образом:

$$p_m = p_a - p_d. \quad (9.9)$$

Действительное атмосферное давление p_d в зависимости от места измерения может быть больше или меньше стандартного атмосферного давления. Однако, если давление измеряется на уровне моря, оно почти всегда меньше стандартного атмосферного давления. Абсолютное давление всегда положительное. Избыточное манометрическое давление бывает либо положительным, либо отрицательным — вакуумметрическим давлением.

Приборы для измерения давления. Для измерения манометрического давления применяют различные приборы. Наиболее распространенные из них — манометры и трубки Бурдона. Ниже рассмотрены только манометры.

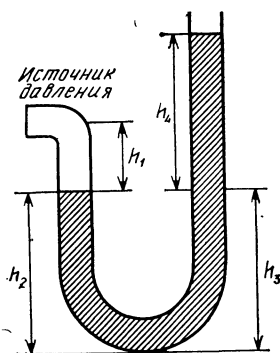


Рис. 9.4. Жидкостный манометр

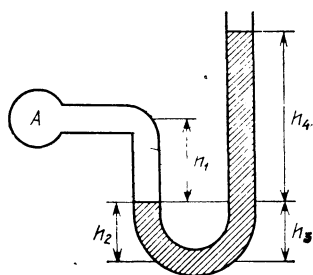


Рис. 9.5. Схема измерения давления в закрытом сосуде с помощью жидкостного манометра

Манометр представляет собой трубку из стекла, пластмассы или другого материала, наполненную жидкостью. Один конец трубки присоединяется к сосуду, в котором необходимо измерить давление, а другой остается открытым, т. е. соединен с атмосферой. На рис. 9.4 показано устройство простейшего манометра. Давление, оказываемое на жидкость в одном из колен U-образной трубки, заставляет уровень жидкости в другом колене сместиться на величину, соответствующую давлению столба жидкости, высота которого определяется разностью между приложенным давлением и атмосферным.

С помощью манометра измеряется разность между приложенным давлением и атмосферным. Это легко показать, если просуммировать все значения давлений вдоль манометрической трубки, начиная от приложенного давления и кончая атмосферным. Приложенное давление — величина неизвестная, его можно обозначить p_s . Во всех точках, лежащих в горизонтальном сечении вдоль поверхности раздела жидкостей, давление будет одинаковым. В соответствии с уравнением (9.7) $\gamma_1 h_1 = p_1$. Аналогично

$$p_s + \gamma_1 h_1 + \gamma_2 h_2 = \gamma_3 h_3 + \gamma_4 h_4 \quad (9.10)$$

Однако согласно уравнению (9.4)

$$\gamma_2 = \gamma_3 = \gamma_4 = \gamma. \quad (9.11)$$

Следовательно, уравнение (9.10) можно записать следующим образом:

$$p_s + \gamma h_1 + \gamma h_2 = \gamma h_3 + \gamma h_4. \quad (9.12)$$

Правое колено U-образной трубки (см. рис. 9.4) соединено с атмосферой. Давление атмосферы на свободную поверхность жидкости в этом колене равно $1 \cdot 10^5$ Па, манометрическое давление равно нулю. Манометр измеряет разность давлений, в данном случае это разность между p_s и атмосферным давлением. Таким

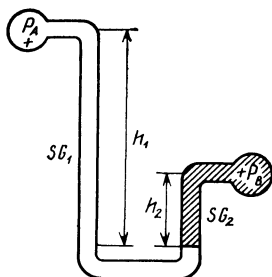


Рис. 9.6. Двухжидкостный манометр для определения разности давлений в двух закрытых сосудах

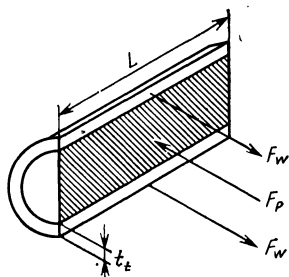


Рис. 9.7. Диаграмма сил, действующих на стенки цилиндрического сосуда

образом, давление, полученное решением уравнения (9.12) относительно неизвестной величины p_s , и будет манометрическим давлением.

Пример 9.1. Определить манометрическое и абсолютное давление в сосуде A (рис. 9.5), если $h_1=3$ м; $h_2=h_3=2$ м; $h_4=6$ м.

Жидкость 1 — масло (удельный вес 0,9), жидкость 2 — вода (удельный вес 1). Удельный вес воды равен 9800 Н/м^3 .

Решение. Удельный вес масла можно представить как удельный вес воды, умноженный на коэффициент удельного веса масла (γ_B):

$$(\gamma_B) \gamma_B = \gamma_m. \quad (9.13)$$

Приравнивания давления, действующие в обоих коленах U-образной трубки, можно записать

$$p_A + \gamma_B (\gamma_B) h_1 + h_2 \gamma_B = h_3 \gamma_B + h_4 \gamma_B. \quad (9.14)$$

Однако $h_2=h_3$, и если учесть, что оба колена заполнены одинаковой жидкостью, то уравнение (9.14) можно переписать в виде

$$p_A + \gamma_B (\gamma_B) h_1 = h_4 \gamma_B; \quad (9.15)$$

$$p_A + (9800 \text{ Н/м}^3) (0,9) (3 \text{ м}) = (6 \text{ м}) (9800 \text{ Н/м}^3);$$

$$p_A + 26460 \text{ Па} = 58800 \text{ Па.}$$

$$p_A = 32340 \text{ Па} — \text{манометрическое давление.}$$

Абсолютное давление = p_m + стандартное атмосферное давление.

Абсолютное давление = $32340 \text{ Па} + 10000 \text{ Па} = 42340 \text{ Па}$.

Пример 9.2. Определить манометрическое давление в сосуде B (рис. 9.6), если $p_A=3 \cdot 10^5 \text{ Па}$; $\gamma_{B1}=1$; $\gamma_{B2}=13,6$; $h_1=3$ м; $h_2=1$ м.

Решение.

$$p_A + h_1 \gamma_B (\gamma_{B1}) = h_2 \gamma_B (\gamma_{B2}) + p_B;$$

$$3 \cdot 10^5 \text{ Па} + (3 \text{ м}) (9800 \text{ Н/м}^3) (1) = (1 \text{ м}) (9800 \text{ Н/м}^3) 13,6 + p_B;$$

$$3 \cdot 10^5 \text{ Па} + 29400 \text{ Па} = 133280 \text{ Па} + p_B.$$

$$p_B = 196120 \text{ Па} — \text{манометрическое давление.}$$

Расчет цилиндрических сосудов на разрыв. Цилиндрические сосуды, к числу которых можно отнести трубопроводы и резервуары, при эксплуатации испытывают значительные внутренние дав-

ления. В связи с этим необходимо знать максимально допустимое давление для того или иного трубопровода или резервуара. В инженерной практике пользуются формулой, устанавливающей зависимость между внутренним давлением в сосуде и напряжением, возникающим в стенках сосуда под действием этого давления. Найденное таким образом напряжение сравнивают с напряжением, максимально допустимым для материала, из которого изготовлен сосуд. Если допустимое напряжение превышает расчетное, сосуд должен выдержать предполагаемое внутреннее давление. В противном случае неизбежна авария.

На рис. 9.7 схематически изображена зависимость между внутренним давлением, которое испытывает цилиндр, и напряжением, возникающим в его стенках под действием этого давления. На схеме изображены силы, действующие перпендикулярно плоскости продольного сечения цилиндра. Сила F_p — это сила давления жидкости, которая может быть рассчитана как произведение внутреннего давления на площадь поверхности, испытывающей действие этого давления:

$$F_p = pDL, \quad (9.16)$$

где L — длина сечения; D — диаметр цилиндра; p — внутреннее давление.

Стенки цилиндра оказывают сопротивление давлению жидкости. Но поскольку в сечение, показанное на рис. 9.7, попадают два продольных разреза стенки цилиндра, уравнение равновесия сил выглядит следующим образом:

$$F_p = 2F_w, \quad (9.17)$$

где F_w — сила, приложенная к поверхности продольного сечения стенки цилиндра.

Сила, возникающая в стенке цилиндра, равна произведению напряжения растяжения на площадь продольного сечения стенки:

$$F_w = \sigma_w A_w; \quad (9.18)$$

$$F_w = \sigma_w t_t L, \quad (9.19)$$

где t_t — толщина стенки.

На основании уравнений (9.16), (9.17) и (9.19) можно записать

$$F_p = LDp = 2(\sigma_w L t_t). \quad (9.20)$$

Решение этого уравнения дает следующее выражение для напряжения:

$$\begin{aligned} \sigma_w &= LDp/2Lt_t; \\ \sigma_w &= Dp/2t_t \end{aligned} \quad (9.21)$$

Уравнение (9.21) устанавливает зависимость между напряжением, возникающим в стенке цилиндрического сосуда, давлением жидкости в сосуде, толщиной стенок и диаметром сосуда. Данные

о величинах допустимых напряжений для различных материалов приведены в табл. 9.1.

Т а б л и ц а 9.1. Допустимые напряжения для различных материалов

Материал	Допустимое напряжение, МПа
Углеродистая сталь	200
Нержавеющая сталь (тип 304)	240—1100
Нержавеющая сталь (тип 316)	200—830
Морская латунь (стандарт В-21 Американского общества испытания материалов)	150
Отожженная медь	69
Медь (холоднотянутая или холоднокатаная)	275
Ковкий чугун (отожженный чугун)	225
Поливинилхлорид при температуре 23°C	48
Хлорированный поливинилхлорид при температуре 23°C	50
Жаропрочный полимерный материал при температуре 23°C	38
Полипропилен при температуре 23°C	34
Полиэтилен при температуре 23°C	23

С помощью уравнения (9.21) можно определить величину напряжения, развивающегося в стенке цилиндрического сосуда при максимальном предполагаемом давлении. Однако при эксплуатации в трубопроводах могут возникать скачки давления, значительно превышающие максимальное давление. Приведенные в табл. 9.1 данные — это средние значения для различных материалов. Действительные значения допустимых напряжений для того или иного трубопровода или стенки резервуара могут в зависимости от условий эксплуатации быть несколько выше или ниже средних значений. Эти отклонения учитываются при проектировании коэффициентом безопасности или запасом прочности, который представляет собой отношение допустимого напряжения к действительной величине напряжения, возникающего в стенках сосудов в процессе эксплуатации:

$$\text{запас прочности} = \frac{\text{допустимое напряжение}}{\text{действительное напряжение}}.$$

Для большинства водопроводных систем запас прочности принимают равным 2. Величина запаса прочности для резервуаров и других сосудов колеблется в довольно широких пределах — от 1,5 до 5 в зависимости от длины трубопровода, характера возможных разрушений и других факторов.

С учетом запаса прочности уравнение для определения напряжения может быть записано в виде

$$\sigma_w \leq \sigma_A / SF, \quad (9.22)$$

где σ_A — допустимое напряжение материала.

Обычно данные о максимально допустимых давлениях, выдерживаемых трубопроводами, предоставляются фирмами-изготовителями. В тех случаях, когда эти данные отсутствуют, можно пользоваться уравнениями (9.21) и (9.22).

Пример 9.3. Определить допустимое рабочее давление для трубопровода номинальным диаметром 5,08 см, выполненного из поливинилхлорида марки 80 по американскому стандарту. Принятый запас прочности равен 2. Внутренний диаметр (ВД) трубы номинальным диаметром 5,08 см составляет 4,93 см, а наружный диаметр (НД) — 6,03 см.

Толщина стенки трубопровода $(\text{НД}-\text{ВД})/2=t_t$;

$$t_t = (6,03 - 4,93)/2;$$

$$t_t = 0,55 \text{ см.}$$

По табл. 9.1. выбираем допустимое напряжение для полихлорвинила, равное 48 МПа.

$$\sigma_w < \sigma_A/SF;$$

$$\sigma_w < (48 \cdot 10^6 \text{ Па})/2;$$

$$\sigma_w < 24 \cdot 10^6 \text{ Па};$$

$$\sigma_w = Dp/2t_t;$$

$$\sigma_w = (4,93 \text{ см}) p/2 (0,55 \text{ см});$$

$$24 \cdot 10^6 = (0,0493 \text{ м}) p/2 (0,0055 \text{ м});$$

$$p = 24 \cdot 10^6 \text{ Па} (2) (0,0055 \text{ м})/0,0493 \text{ м};$$

$$p = 5,35 \text{ МПа.}$$

Другие вопросы гидростатики, такие, например, как методика определения сил давления на поверхность погруженного тела и центра давления, расчет сил, действующих на плотины и перемычки, также могут представлять интерес для специалистов, занимающихся разведением водных организмов. Однако в этой главе рассматриваются только те вопросы гидростатики, которые имеют непосредственное отношение к инженерным аспектам аквакультуры. Специалисты, интересующиеся вопросами гидростатики, не вошедшими в настоящую книгу, могут обратиться к соответствующей литературе, например к монографии Стритера (Streeter, 1962), Кинга и др. (King et al., 1948).

ГИДРОДИНАМИКА

Гидродинамика — раздел гидравлики, в котором изучаются законы движения жидкости. Поскольку специалисты по разведению водных организмов имеют дело с движущейся водой, вопросы гидродинамики имеют для них первостепенное значение. В основе теории движения жидкостей лежат четыре физических закона: режим движения; закон сохранения масс; закон сохранения энергии и три закона движения Ньютона.

Режим движения. Режим движения жидкостей может быть ламинарным и турбулентным. Если представить жидкость как тело, состоящее из отдельных частиц или элементов, то ламинарный режим движения можно определить как движение, при котором

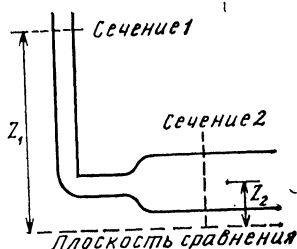


Рис. 9.8. Прохождение жидкости через участок закрытого трубопровода

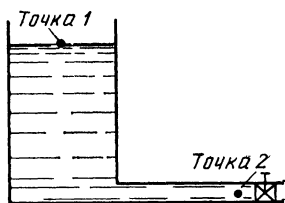


Рис. 9.9. Давление как форма энергии жидкости

все частицы тела движутся в одном направлении с одинаковой скоростью. Таким образом, частицы образуют струйки (или слои), движение которых относительно друг друга постоянно и завихрения отсутствуют.

Турбулентное движение характеризуется поперечным перемещением струй, завихрениями и другими хаотичными движениями. Потери энергии в турбулентном потоке больше, чем в ламинарном, из-за значительного внутреннего трения. Для ламинарных потоков благоприятны низкие скорости потоков, трубопроводы небольшого диаметра и высокие вязкости жидкости. Для турбулентного режима благоприятны противоположные условия. На предприятиях по разведению водных организмов, как правило, имеют дело с турбулентными потоками, так как при высоких скоростях движения жидкости стоимость эксплуатации трубопроводов уменьшается.

Закон сохранения масс. В замкнутом трубопроводе количество жидкости, протекающее через все его сечения, постоянно. На рис. 9.8 изображен участок замкнутого трубопровода, по длине которого взято два сечения — 1 и 2.

Поскольку через оба сечения должно пройти одинаковое количество воды, для этой системы на основе закона сохранения масс можно записать следующее уравнение:

$$v_1 A_1 \gamma_1 = v_2 A_2 \gamma_2, \quad (9.23)$$

где v — скорость; A — площадь поперечного сечения; γ — удельный вес жидкости.

Учитывая несжимаемость жидкости, проходящей через сечения 1 и 2, можно принять, что

$$\gamma_1 = \gamma_2. \quad (9.24)$$

Тогда уравнение (9.23) принимает вид

$$v_1 A_1 = v_2 A_2. \quad (9.25)$$

Уравнение (9.25) называется уравнением неразрывности и является одним из основных уравнений гидродинамики. Полученное для движения несжимаемой жидкости по замкнутому трубопро-

воду уравнение (9.25) распространяется также на движение несжимаемой жидкости в открытом канале.

Пример 9.4. Определить скорость потока в сечении 2 (см. рис. 9.8), если в сечении 1 она составляет 0,5 м/с, а диаметр трубопровода в сечении 2 равен 30 см.

$$v_1 A_1 = v_2 A_2;$$

$$v_1 A = Q_1,$$

где Q_1 — объем жидкости, протекающей в единицу времени через сечение 1.

$$Q_1 = 0,5 \text{ м}^3/\text{с} = v_2 A_2;$$

$$v_2 A_2 = \pi R^2 v_2;$$

$$0,5 \text{ м}^3/\text{с} = v_2 \pi (0,30 \text{ м}/2)^2;$$

$$0,5 \text{ м}^3/\text{с} = v_2 (0,0707);$$

$$7,07 \text{ м}/\text{с} = v_2.$$

Закон сохранения энергии. Из закона сохранения энергии вытекает еще одно уравнение гидродинамики, позволяющее решать различные задачи. Энергия, которой обладает частица жидкости в любой точке, состоит из потенциальной энергии положения, потенциальной энергии давления и кинетической энергии движения.

Частица жидкости в сечении 1 (см. рис. 9.8) обладает потенциальной энергией, обусловленной ее положением относительно плоскости сравнения или плоскости нулевого энергетического потенциала. Эту энергию $(PE)_e$ можно выразить как произведение веса частицы W на ее геометрическую высоту над плоскостью сравнения Z_1 :

$$(PE)_{e1} = WZ_1. \quad (9.26)$$

Аналогично для частицы в сечении 2 (см. рис. 9.8) можно записать

$$(PE)_{e2} = WZ_2. \quad (9.27)$$

Если жидкость находится под давлением, она обладает потенциальной энергией давления. На рис. 9.9 показан резервуар, заполненный жидкостью, нижняя часть которого переходит в горизонтальный трубопровод. На конце трубопровода установлен клапан, предотвращающий свободное вытекание жидкости из резервуара. Потенциальная энергия частицы в точке 1 (см. рис. 9.9) определяется только ее геометрической высотой, так как единственное давление, оказываемое на поверхность жидкости в этой точке, — это атмосферное давление, величина которого совпадает с нулевым значением на манометрической шкале отсчета. При закрытом клапане на трубопроводе давление в точке 2 согласно уравнению (9.7) будет равно γh (h — высота заполнения резервуара жидкостью). Это давление способно производить работу, поэтому его можно рассматривать как одну из форм потенциальной энергии. Энергия давления $(PE)_p$ может быть выражена как произведение веса элементарной частицы жидкости на приложен-

ное к ней давление. В соответствии с уравнением (9.7) давление жидкости можно определить по формуле

$$h = P/\gamma,$$

отсюда

$$(PE)_p = PW/\gamma. \quad (9.28)$$

Движущиеся жидкости обладают кинетической энергией, которую можно определить из основного уравнения

$$KE = 1/2 (mv^2), \quad (9.29)$$

где m — масса; v — скорость.

В соответствии с законами Ньютона

$$m = W/g. \quad (9.30)$$

Подставляя формулу (9.30) в уравнение (9.29), получим

$$KE = Wv^2/2g. \quad (9.31)$$

Уравнение (9.31) характеризует кинетическую энергию частицы жидкости, движущейся со скоростью v .

Полная энергия частицы жидкости E_e является суммой потенциальной и кинетической энергии. На основании уравнений (9.26), (9.28) и (9.31) можно получить следующее математическое выражение для величины полной энергии:

$$E_e = ZW + PW/\gamma + v^2W/2g. \quad (9.32)$$

В соответствии с законом сохранения энергии полная энергия частицы жидкости в точке 1 должна быть равна полной энергии частицы жидкости в точке 2 (см. рис. 9.9):

$$Z_1W + P_1W/\gamma + v_1^2W/2g = Z_2W + P_2W/\gamma + v_2^2W/2g. \quad (9.33)$$

Разделив левую и правую части последнего уравнения на W , получим

$$Z_1 + P_1/\gamma + v_1^2/2g + Z_2 + P_2/\gamma + v_2^2/2g. \quad (9.34)$$

Уравнение (9.34), известное как уравнение Бернулли, применимо к идеальной жидкости, не имеющей энергетических потерь на участке между сечениями 1 и 2.

В реальных жидкостях всегда имеются потери на трение жидкости о стенки трубопроводов. С учетом этих потерь уравнение Бернулли должно быть переписано следующим образом:

$$\begin{aligned} Z_1 + P_1/\gamma + v_1^2/2g + \text{подводимая энергия} &= Z_2 + P_2/\gamma + v_2^2/2g + \\ + \text{потери на преодоление местных гидравлических сопротивлений} &+ \\ + \text{потери на трение о стенки трубопроводов.} &\quad (9.35) \end{aligned}$$

Из уравнения (9.35) видно, что подводимая энергия (например, от насоса, расположенного между точками 1 и 2) должна

входить в левую часть уравнения как положительная величина. Потери, обусловленные гидравлическими сопротивлениями, и потери на трение жидкости о стенки трубопровода должны фигурировать в правой части уравнения, относящейся к частице жидкости, расположенной в нижнем по направлению движения жидкости сечении трубопровода, так как они выражают энергетические потери на преодоление сопротивлений трения при движении жидкости от точки 1 до точки 2.

Потери, связанные с преодолением местных гидравлических сопротивлений, возникают при изменении размера поперечного сечения в направлении потока, входе и выходе жидкости и вследствие других изменений. Величина таких потерь определяется экспериментально и учитывается при расчетах коэффициентом потерь K , умноженным на скоростной напор:

$$\text{Потери напора на преодоление гидравлических сопротивлений} = K (v_2^2/2g). \quad (9.36)$$

Полученные экспериментально коэффициенты потерь для трубопроводов приведены в табл. 9.2.

Таблица 9.2. Коэффициенты потерь на преодоление гидравлических сопротивлений

Арматура	Коэффициент потерь
Вентиль (открыт полностью)	10,0
Угловой вентиль (открыт полностью)	5,0
Откидной обратный клапан (открыт полностью)	2,5
Задвижка (открыта полностью)	0,19
Колено трубы с поворотом на 180°	2,2
Стандартный тройник	1,8
Стандартное колено	0,9
Колено среднего радиуса изгиба	0,75
Колено большого радиуса изгиба	0,6
Входное отверстие трубопровода (прямоугольное сечение)	0,5
Входное отверстие трубопровода (слегка скругленное сечение)	0,2
Входное отверстие трубопровода (при входе в резервуар)	0,8

Если на рассматриваемом участке между двумя сечениями трубопровода системы имеется два или более гидравлических сопротивления, потери на их преодоление суммируются.

Пример 9.5. Определить потерю напора в колене трубопровода, изогнутого под углом 90°, с номинальным диаметром, равным 2,54 см, если расход жидкости через это колено составляет 60 л/мин.

Внутренний диаметр трубы с номинальным диаметром 2,54 см равен 2,43 см.

$$Q = Av = 1 \text{ л/с};$$

$$0,001 \text{ м}^3/\text{с} = \pi r^2 v;$$

$$v = \frac{1 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}}{3,14 [(2,43/2) 10^{-2} \text{ м}]^2};$$

$$v = 2,2 \text{ м/с};$$

$$\text{потеря напора} = K (v^2/2g);$$

$$\text{потеря напора} = \frac{0,9 (2,2 \text{ м/с})^2}{2 (9,8 \text{ м/с})}.$$

$$\text{Потеря напора} = 0,22 \text{ м вод. ст.}$$

Потери на трение, обусловленные трением жидкости о стенки трубопровода, зависят от скорости движения жидкости, ее плотности, вязкости, диаметра трубопровода и характера шероховатости его стенок. Математически это выражается следующим образом:

$$f_f = f(v, D, \varepsilon, \rho, \mu); \quad (9.37)$$

где f_f — коэффициент сопротивления трения; v — скорость потока; D — диаметр трубопровода; ε — шероховатость стенок трубопровода (абсолютная); ρ — плотность жидкости; μ — вязкость жидкости; f — функция.

Пять членов этой формулы можно представить в виде двух безразмерных величин:

$$f_f = f\left(\frac{\rho v D}{\mu}, \frac{\varepsilon}{D}\right). \quad (9.38)$$

Одна из этих безразмерных величин $\rho v D / \mu$ известна как число Рейнольдса (которое может быть выражено так же как $v D / \nu$, где ν — кинематическая вязкость); другая называется относительной шероховатостью. Можно рассматривать число Рейнольдса как отношение сил инерции к силам вязкости. Число Рейнольдса определяет режим движения потока (ламинарный или турбулентный). Если $Re > 2000$, режим ламинарный, при $Re > 4000$ режим становится турбулентным. В диапазоне чисел Рейнольдса от 2000 до 4000 режим движения потока нестабильный (неустановившееся течение). Потоки, характеризующиеся числами Рейнольдса в этом диапазоне, считаются неблагоприятными в инженерной практике и их следует по возможности избегать.

Вторая безразмерная величина в уравнении (9.37) — ε / D — это относительная шероховатость. Она представляет собой отношение высоты выступов шероховатости на внутренней поверхности трубы к диаметру трубы. Коэффициент сопротивления трения f_f также является безразмерной величиной.

Экспериментальные работы Муди по определению значений безразмерных членов уравнения (9.38) позволили представить зависимость между этими величинами в виде диаграммы, известной теперь как диаграмма Муди (рис. 9.10). По горизонтальной оси диаграммы Муди отложены числа Рейнольдса, по вертикальной — коэффициент сопротивления трения, значения относительной шероховатости представлены отдельной кривой. В ламинарном режиме ($Re < 2000$) коэффициент сопротивления трения является линейной функцией числа Рейнольдса:

$$f_f = 64/Re, \quad (9.39)$$

где Re — число Рейнольдса.

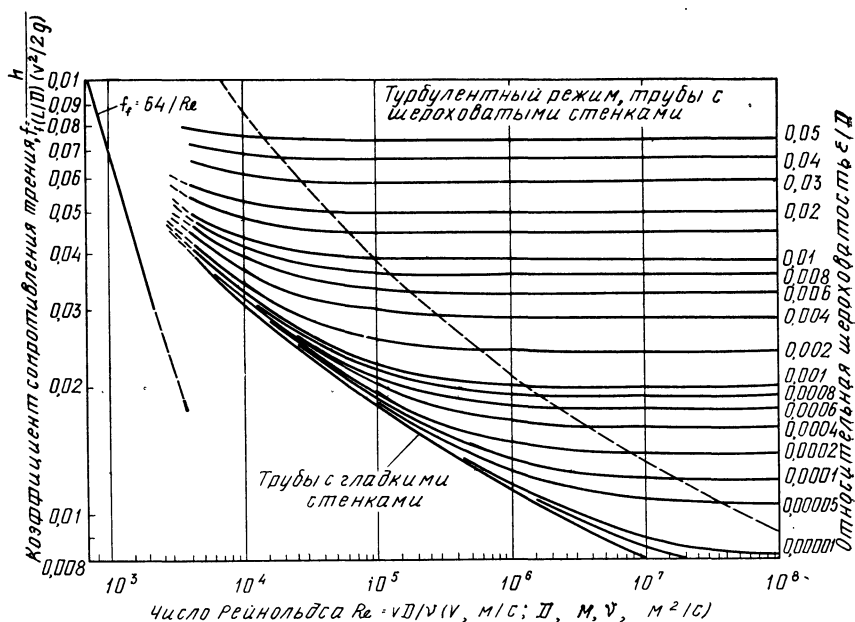


Рис. 9.10. Диаграмма Мудди (Moody, 1944)

В критическом диапазоне чисел Рейнольдса между значениями 2000 и 4000 точное определение коэффициента сопротивления трения связано с большими трудностями, так как для этого диапазона характерна неустойчивость движения потока, режим которого может все время изменяться от ламинарного к турбулентному и наоборот. При $Re > 4000$ имеет место турбулентное движение, в этом режиме зависимость между числом Рейнольдса и коэффициентом сопротивления трения носит нелинейный характер. Коэффициент шероховатости зависит от материала стенки (табл. 9.3). Для определения числа Рейнольдса можно воспользоваться данными, приведенными в табл. 9.4.

Таблица 9.3. Абсолютная шероховатость для некоторых труб (Moody, 1944)

Материал трубы	Абсолютная шероховатость, см
Клепаная сталь	0,091—0,91
Бетон	0,03—0,31
Деревянная клепка	0,018—0,091
Чугун	0,026
Оцинкованное железо	0,015
Чугун с битумным покрытием	0,012
Сортовая сталь или пудлинговое железо	0,0046
Тянутые трубы	0,00015
Трубы из поливинилхлорида	Приблизительно 0,000005

Таблица 9.4. Абсолютная и кинематическая вязкость некоторых жидкостей

Жидкость	Температура, °C	Абсолютная вязкость, Па·с
Вода	—	См. рис. 2.7
Соленая вода	—	См. рис. 2.7
Смазочные масла	15,5	0,10
SAE 10*	65,5	0,01
	15,5	0,400
SAE 30*	65,5	0,027
	21,1	6,59
Меласса	37,8	1,88
	65,5	0,373
Молоко цельное	0	0,0043
	20	0,0021
20%-ный раствор пропиленгликоля в воде	0	0,0042
(20% по весу)	20	0,002

* SAE — американская вязкостная система

Определив коэффициент сопротивления трения, можно подсчитать потерю напора на преодоление местных сопротивлений:

$$h = f_f (L/D) (v^2/2g). \quad (9.40)$$

где h — потеря напора, связанная с местными сопротивлениями, м; f_f — коэффициент сопротивления трения (безразмерная величина); L — длина трубопровода, м; D — диаметр трубопровода, м; v — скорость потока, м/с; g — ускорение силы тяжести, м/с².

Пример 9.6. Определить потерю напора в оцинкованном трубопроводе длиной 100 м с номинальным диаметром 7,62 см, по которому перепускается вода температурой 20 °C. Расход воды составляет 0,06 м³/мин.

Внутренний диаметр трубы с номинальным диаметром 7,62 см равен 7,37 см по американским стандартам на трубопроводы.

$$Q = Av,$$

$$0,6 \text{ м}^3/\text{мин} = \pi (0,0737 \text{ м}/2)^2 v;$$

$$(0,6) (4)/3,14 (0,0054) = v;$$

$$141,5 \text{ м}/\text{мин} = v;$$

$$2,36 \text{ м}/\text{с} = v$$

Число Рейнольдса $Re = \rho v D / \mu = v D / \gamma$. Кинематическая вязкость воды при температуре 20 °C $= 1,1 \cdot 10^{-2} \text{ см}^2/\text{с}$;

$$Re = \frac{2,36 \text{ м}/\text{с} (7,37 \cdot 10^{-2} \text{ м})}{1,1 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}} = 15,8 \cdot 10^4.$$

Абсолютная шероховатость оцинкованной трубы по табл. 9.3. равна 0,015 см. Отношение абсолютной шероховатости к диаметру трубы дает относительную шероховатость, в этом примере она равна 0,002. По диаграмме Муди коэффициент сопротивления трения

$$f_f = 0,0194,$$

отсюда

$$h = f_f (L/D) (v^2/2g);$$

$$h = 0,0194 \left(\frac{100}{7,37 \cdot 10^{-2} \text{ м}} \right) \left[\frac{2,36 \text{ м/с}^2}{2 (9,8 \text{ м/с}^2)} \right];$$

$$h = 7,48 \text{ м.}$$

Подводимая энергия на участке трубы между двумя сечениями 1 и 2 [уравнение (9.35)] — это энергия, обычно обеспечиваемая насосом. Необходимо уточнить и конкретизировать эту величину, чтобы получить для нее математическое выражение. Сообщаемую насосом энергию E_p можно представить как произведение веса жидкости W на полный напор системы h_p , который должен преодолевать этот насос [уравнение (9.38)];

$$E_p = Wh_p. \quad (9.41)$$

Вводя это выражение в левую часть уравнения (9.33) вместо величины напора h_p , создаваемая насосом, и будет характеризовать величину подводимой энергии в уравнении (9.35).

Теперь уравнение (9.35) можно записать с учетом формул (9.36), (9.40) и (9.41):

$$\begin{aligned} Z_1 + P_1/\gamma + v_1^2/2g + h_p = Z_2 + P_2/\gamma + v_2^2/2g + \sum_{i=1}^n K(v_i^2/2g) + \\ + \sum_{j=1}^m f_j(L_j/D_j)(v_j^2/2g), \end{aligned} \quad (9.42)$$

где v_i , v_j — скорость потока в месте преодоления гидравлического сопротивления или местная скорость на участке трубы; $\sum_{i=1}^n$ — сумма потерь напора от $i=1$ до $i=n$ (n — число различных гидравлических сопротивлений, вызывающих потери энергии в системе); $\sum_{j=1}^m$ — сумма потерь напора от $j=1$ до $j=m$ (m — число участков труб разного диаметра).

Пример 9.7. Определить расход через оцинкованный трубопровод (рис. 9.11)

диаметром 10 см и длиной 200 м; $h_1=20$ м, $h_2=30$ м. В начале трубы расположена полностью открытая задвижка. Число Рейнольдса для трубы равно $1 \cdot 10^5$.

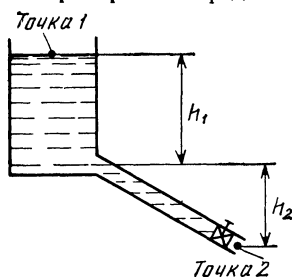


Рис. 9.11. Применение уравнения Бернулли для определения расхода

Для двух сечений, взятых по длине трубопровода 1 и 2, может быть записано уравнение Бернулли. Выбор этих сечений обусловлен соображениями удобства: скорость течения жидкости в сечении 1 может быть принята равной нулю, если учесть, что вместимость резервуара достаточно велика, чтобы движением жидкости в этом сечении 1 можно было пренебречь. Поскольку оба сечения 1 и 2 соединены с атмосферой, манометрическое давление, оказываемое на жидкость в этих сечениях, равно нулю. Уравнение Бернулли будет иметь вид

$$Z_1 + P_1/\gamma + v/2g + \text{подводимая энергия} = Z_2 + P_2/\gamma + v_2^2/2g + \sum_{i=1}^n K (v_2^2/2g) + \\ + \sum_{j=1}^m f_f(L/D) (v_2^2/2g); \\ 50 + 0 + 0 + 0 = 0 + v_2^2/2g + \sum_{i=1}^n K (v_2^2/2g) + \sum_{j=1}^m f_f(L/D) (v_2^2/2g). \quad (9.43)$$

Отдельно для каждого гидравлического сопротивления необходимо определить потерю напора: h_{fit} = потеря напора на входе (кромка прямоугольной формы) + потеря напора в задвижке;

$$h_{fit} = K_1 (v_2^2/2g) + K_2 (v_2^2/2g).$$

Из табл. 9.2 берут значения:

$$K_1 = 0,5; \quad K_2 = 0,19; \\ h_{fit} = (0,5 + 0,19) \frac{v_2^2}{2(9,8)}; \\ h_{fit} = 0,0352v_2^2.$$

Потеря напора, вызванная трением жидкости о стенки трубы,

$$h_f = f_f(L/D) (v_2^2/2g).$$

Коэффициент сопротивления трения берется по диаграмме Муди.

Число Рейнольдса задано, оно равно $1 \cdot 10^5$.

Относительная шероховатость оцинкованной трубы составит

$$0,015/10 \text{ см} = 0,0015.$$

От точки $1 \cdot 10^5$ на горизонтальной оси диаграммы Муди следует восстановить перпендикуляр до пересечения с кривой относительной шероховатости, соответствующей значению 0,0015, и, следя по горизонтальной оси, найти значение коэффициента сопротивления трения, которое будет равно примерно 0,024.

С помощью уравнения (9.40) можно определить

$$h = 0,024 \left(\frac{200 \text{ м}}{0,1 \text{ м}} \right) \left(\frac{v_2^2}{2(9,8 \text{ м/с}^2)} \right); \\ h = 2,45v_2^2.$$

Подстановка полученных значений в уравнение (9.43) дает выражение для расхода:

$$50 = \frac{v_2^2}{2(9,8 \text{ м/с}^2)} + 0,0352v_2^2 + 2,45v_2^2; \\ 50 = 0,051v_2^2 + 0,0352v_2^2 + 2,45v_2^2; \\ 50 = 2,54v_2^2; \\ 19,69 = v_2^2; \\ 4,44 \text{ м/с} = v_2;$$

$$Q = Av;$$

$$Q = \pi R^2 v;$$

$$Q = 3,14 \left(\frac{0,10 \text{ м}}{2} \right)^2 (4,44 \text{ м/с})$$

$$Q = 0,035 \text{ м}^3/\text{с}.$$

ДВИЖЕНИЕ ЖИДКОСТИ В ОТКРЫТОМ КАНАЛЕ

Движение жидкости в открытых каналах является результатом действия только гравитационных сил и характеризуется тем, что на свободной поверхности жидкости давление равно атмосферному.

Теоретическое решение задачи о такого рода режиме движения до некоторой степени ограничено. Математически можно показать, что формула (9.44) справедлива для случая движения жидкости в открытых каналах:

$$v = CR^x S^y, \quad (9.44)$$

где v — скорость потока; C — константа (опытная); R — гидравлический радиус (определение дано ниже); S — уклон канала; x и y — показатели степени (константы).

Поперечное сечение открытого канала, показанного на рис. 9.12, имеет прямоугольную форму. Глубина канала h , ширина b . Таким образом, площадь живого сечения потока

$$A = bh. \quad (9.45)$$

Часть периметра сечения канала, которая соприкасается с водой, называется смоченным периметром

$$P_w = 2h + b. \quad (9.46)$$

Гидравлическим радиусом называют отношение площади живого сечения к смоченному периметру:

$$R = A/P_w. \quad (9.47)$$

Так, для прямоугольного сечения, показанного на рис. 9.12,

$$R = bh/(2h + b). \quad (9.48)$$

Уклон S в уравнении (9.44) — это уклон дна канала в сторону движения потока, определяемый как перепад высот канала, отнесенный к единице его длины.

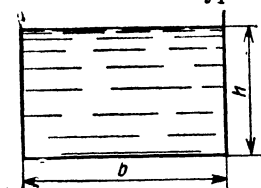


Рис. 9.12. Поперечное сечение открытого канала прямоугольной формы

Хотя уравнение (9.44) опирается на солидную теоретическую базу, его практическое применение без знания коэффициента C и констант x и y затруднительно. Различные исследователи определяли эти величины эмпирически. Наибольшее распространение получила формула Маннинга, на основе кото-

рой построено дальнейшее изложение. Эта формула, называемая формулой Маннинга, была впервые выведена в 1890 г. и записывается в единицах системы СИ в следующем виде:

$$v = 1/n R^{2/3} S^{1/2}. \quad (9.49)$$

Полученные экспериментально значения коэффициента n для наиболее распространенных материалов и видов труб приведены в табл. 9.5. Минимальное значение n соответствует условиям дви-

Таблица 9.5. Коэффициенты шероховатости n для использования в формуле Маннинга (Horton 1916; Frevert et al, 1962; Israelsen and Hansen, 1962)

Каналы	Коэффициент
Земляные	
прямые с одинаковым сечением	0,017—0,025
извилистые со слабым течением	0,022—0,030
с земляным дном и булыжными стенками	0,028—0,035
земляные каналы, прорытые землечерпалкой	0,025—0,033
каналы, дно которых выложено грубо отесанным камнем, земляные стенки покрыты водорослями	0,025—0,040
каналы, высеченные в скале, с гладкими стенками и дном, с постоянным сечением	0,025—0,035
каналы, высеченные в скале, с потрескавшимися и неровными стенками	0,035—0,050
Заросшие травой и другой водной растительностью	
плотный ровный травяной покров высотой более 25 см	
бермудская трава	0,04—0,20
трава кудзу	0,07—0,23
леспедеца, японский клевер	0,047—0,095
плотный ровный травяной покров высотой менее 60 см	—
бермудская трава	0,034—0,11
трава кудзу	0,045—0,16
леспедеца, японский клевер	0,023—0,05
Реки и ручьи	
а) чистые, прямые берега без порожистых участков и заводей	0,025—0,033
б) то же, что и (а), но с камнями и растительностью	0,030—0,040
в) извилистые с заводами, мелями, незасоренные	0,033—0,045
г) то же, что и (в), но с менее выраженными перекатами	0,040—0,055
д) то же, что и (в), но русла частично заросшие и засоренные камнями	0,035—0,050
е) то же, что и (д), но с большим количеством камней, которыми завалены целые участки русла	0,045—0,060
ж) речные плесы со слабым течением, сильно заросшие	0,050—0,008
з) сильно заросшие речные плесы	0,075—0,150
Облицованные	
бетонированные каналы	0,012—0,018
цементно-бутовая кладка	0,017—0,030
бутовая кладка	0,025—0,035
металлические гладкие желоба	0,011—0,015
металлические с рифлениями	0,021—0,026
деревянные строганные лотки	0,010—0,015
нестроганные деревянные лотки	0,011—0,015
кирпичная кладка на цементном растворе	0,012—0,017

жения жидкости в совершенно новых и чистых трубах или каналах; для труб, бывших в употреблении или открытых каналов, забитых растительностью и другими загрязнениями, значения n будут максимальными. При расчете труб и каналов обычно берут средние значения из соответствующего диапазона.

Большинство открытых каналов рассчитывается по формуле Маннинга и уравнению неразрывности. Среди них — открытые каналы, реки, ручьи, дренажные канавы, лотки и сточные желоба. При расчете замкнутых каналов или каналов, покрытых растительностью, необходимо учитывать ограничения влияния эрозии и толщины осадков (дополнительно к ограничениям, накладываемым формулой Маннинга и местным рельефом). Скорости, превышающие допустимые значения, вызывают эрозию стен каналов, а низкие скорости ускоряют рост отложений; последнее может вызвать необходимость увеличения поперечного сечения канала, что приводит к значительному возрастанию капитальных затрат. В табл. 9.6 и 9.7 приведены максимально допустимые значения скоростей для различных грунтов и отложений. Минимально допустимая скорость движения жидкости в канале определяется условием возможного образования отложений из материалов взвешенных в жидкости. Желательно, чтобы скорости превышали минимально допустимые значения, так как сооружение каналов с низкой скоростью движения воды обходится очень дорого.

Таблица 9.6. Максимально допустимые значения скоростей при движении жидкости в прямоточных каналах (Fortier and Sobey, 1926)

Материал	Коэффициент n	Скорость, м/с	
		чистая вода	вода с илом
Мелкозернистый песок, затянутый коллоидной пленкой	0,020	0,46	0,76
Супесь, без коллоидной пленки	0,020	0,53	0,76
Илистый суглинок	0,020	0,61	0,91
Наносный ил, без коллоидной пленки	0,020	0,61	1,07
Обычный плотный суглинок	0,020	0,76	1,07
Вулканический пепел	0,020	0,76	1,07
Глина средней плотности со значительным коллоидным слоем	0,025	1,14	1,52
Наносный ил с коллоидной пленкой	0,025	1,14	1,52
Сланец и глинистый конгломерат с песком и гравием	0,025	1,83	1,83
Мелкий гравий	0,020	0,76	1,52
Булыжник, покрытый суглинком, без коллоидного слоя	0,030	1,22	1,68
Булыжник, затянутый пленкой ила, со сплошным коллоидным слоем	0,030	1,22	1,68
Крупный гравий без коллоидного слоя	0,025	1,22	1,83
Булыжник и галька	0,035	1,52	1,68

Таблица 9.7. Максимально допустимые скорости (в м/с) движения жидкостей в открытых каналах, заросших растительностью (Ree, 1949)

Травяной покров	Уклон дна, %	Тип грунта	
		стойкий к эрозии	легко под- дающийся эрозии
Бермудская трава	0—5	2,50	1,85
	5—10	2,15	1,50
	Свыше 10	1,85	1,25
Буффальская трава	0—5	2,15	1,50
Кентуккийский пырей	5—10	1,85	1,25
Кормовые травы	Свыше 10	1,50	0,90
Трава бутелоуа			
Многоножка	0,5	2,75	2,15
Бермудская трава (скошенная)	5—10	2,50	1,85
	Свыше 10	2,15	1,50
Смесь разных трав	0—5	1,50	1,25
	5—10	1,25	0,90
	Свыше 10	Не рекомендуется	
Леспедеца, японский клевер	0,5	1,0	0,75
Плакущая полевичка	5—10	Не рекомендуется	
Бородач вергинский	Свыше 10	Не рекомендуется	
Пуэария волосистая			
Люцерна			
Ползучий сорняк			
Однолетние растения, применяемые в качестве временного покрытия (широко распространенный японский клевер и суданская трава)	0—5	1,0	0,75
	5—10	Не рекомендуется	
	Свыше 10	Не рекомендуется	

Форма поперечного сечения канала определяется его назначением, видом материала, из которого выполнены дно и стенки, экономическими соображениями, а также из условия минимальных потерь жидкости на испарение. Каналы с бетонированными стенками или подобные им обычно имеют прямоугольную и трапециевидальную формы поперечного сечения. Каналы, прокладываемые в грунте, обычно делают трапециевидальной формы, так как при прямоугольной форме сечения боковые стенки таких каналов неустойчивы. Боковые стенки каналов с трапециевидальной формой сечения могут иметь различный уклон — от 3:1 (отношение горизонтального катета к вертикальному) до 1:1; последняя величина встречается лишь в условиях исключительно плотного грунта. Желоба для транспортировки рыбы или овощей часто имеют сечение прямоугольной формы, что объясняется конструктивными и экономическими соображениями. Глубокие узкие каналы позволяют значительно уменьшить площадь зеркала воды и сократить таким образом потери на испарение.

С точки зрения гидравлики форму поперечного сечения канала следует выбирать с таким расчетом, чтобы при минимальном смо-

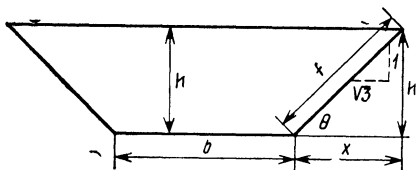


Рис. 9.13. Поперечное сечение открытого канала, трапецевидной формы

ченном периметре площадь живого сечения потока была максимальной, т. е. гидравлический радиус должен быть максимальным. Чем больше гидравлический радиус, тем меньше сопротивление, преодолеваемое потоком, и тем больше расход воды при одинаковом поперечном сечении. В этом смысле наиболее совершенной является форма круга, так как у него максимальный радиус R . Однако для каналов больших размеров круглое сечение не применяется, так как это слишком сложно и дорого.

Уравнение (9.50) характеризует зависимость между шириной канала по дну b и глубиной h для наиболее выгодного с точки зрения гидравлики сечения при прямоугольной форме канала:

$$b = 2h; \quad (9.50)$$

$$b = 2h \operatorname{tg}(\theta/2), \quad (9.51)$$

где θ — угол между боковой стенкой канала и горизонтальной плоскостью.

Облицовка внутренней поверхности открытых каналов имеет несколько преимуществ. Бетонирование, например, значительно сокращает утечки воды, максимально допустимые скорости могут быть увеличены. За счет увеличения скоростей появляется возможность пропустить требуемый расход через меньшее поперечное сечение. При сооружении каналов малого сечения уменьшается стоимость постройки. Если экономия за счет уменьшения поперечного сечения канала с избытком компенсирует затраты на его облицовку, то облицовка становится экономически выгодной. Однако увеличение скоростей не всегда возможно, для этого необходим соответствующий уклон дна. Обслуживание облицованных каналов обходится дешевле, так как на внутренних стенках таких каналов не развивается растительность.

Пример 9.8. Определить размеры открытого канала трапецевидного сечения (рис. 9.13), по которому должна подводиться вода ($1,5 \text{ м}^3/\text{с}$) из реки к ферелевому хозяйству. Канал прокладывается в плотном глинистом грунте, без облицовки. Уклон боковых стенок принять равным $1/3:1$, т. е. максимальный для данного грунта. Топография местности ограничивает уклон дна $0,09 \%$.

По табл. 9.6 максимально допустимая скорость равна $1,14 \text{ м/с}$, коэффициент шероховатости $n=0,025$. Если предположить, что скорость в канале равна максимально допустимой, то

$$Q = Av; \quad (9.52)$$

$$1,5 \text{ м}^3/\text{с} = A \cdot 1,14 \text{ м/с};$$

$$1,32 \text{ м}^2 = A.$$

Таким образом, площадь поперечного сечения канала при скорости движения в нем $1,14 \text{ м/с}$ и расходе $1,5 \text{ м}^3/\text{с}$ должна составлять $1,32 \text{ м}^2$.

Площадь поперечного сечения канала рассчитывается по формуле

$$A = hb + 2(1/2 bx). \quad (9.53)$$

Из уравнения (9.13) и определения тангенса

$$\begin{aligned} \operatorname{tg} \theta &= h/x; \\ x &= h/\operatorname{tg} \theta. \end{aligned} \quad (9.54)$$

Из подобия треугольников

$$\begin{aligned} \operatorname{tg} \theta &= 1/\sqrt{3}; \\ x &= h/\operatorname{tg} \theta = \sqrt{3} h. \end{aligned} \quad (9.55)$$

Подставив выражение (9.55) в формулу (9.53), получаем

$$\begin{aligned} A &= hb + b \sqrt{3} h; \\ A &= hb + 1,732 bh; \\ A &= 2,732 hb. \end{aligned} \quad (9.56)$$

Поперечное сечение канала должно быть максимально выгодным с точки зрения гидравлики. Для трапецевидной формы сечения зависимость ширины канала по дну b от глубины канала h и угла наклона боковых стенок к горизонтальной плоскости θ имеет следующий вид:

$$\begin{aligned} b &= 2h \operatorname{tg} \frac{\theta}{2}; \\ \theta &= \operatorname{tg}^{-1}(1/\sqrt{3}); \\ \theta &= 30^\circ; \\ b &= 2h \operatorname{tg} 15^\circ, \\ b &= 2h (0,268); \\ b &= 0,536 h. \end{aligned} \quad (9.57)$$

Последнее выражение позволяет исключить одну из неизвестных величин в формуле (9.56):

$$\begin{aligned} A &= 2,732h(b), \\ A &= 2,732h(0,536h); \\ A &= 1,46h^2. \end{aligned}$$

Выше [уравнение (9.52)] площадь поперечного сечения была определена в 1,32 м². Таким образом,

$$\begin{aligned} 1,32 \text{ м}^2 &= (1,46 \text{ м}) h; \\ 0,9 \text{ м} &= h. \end{aligned}$$

Ширину канала по дну можно подсчитать, воспользовавшись выражением (9.57):

$$\begin{aligned} h &= (0,536) (0,9 \text{ м}); \\ b &= 0,48 \text{ м}^{**}. \end{aligned}$$

Величины h , b и θ определяют поперечное сечение канала. Однако до сих пор не учитывался уклон дна канала и его влияние на скорость. Это ограничение учитывается расчетными величинами b и h и формулой Маннинга

$$v = (1/n) R^{2/3} S^{1/2}. \quad (9.58)$$

* В тексте опечатка: вместо h должно быть h^2 . — Прим. ред.

** В расчет вкралась ошибка. Величины h и b следует подсчитывать следующим образом: $h = \sqrt{A/1,46} = \sqrt{1,32/1,46} = 0,96$; $b = 0,96 \cdot 0,536 = 0,51$. — Прим. ред.

Если значения n и S известны из условия задачи, то значение R следует определить

$$R = A/p_w. \quad (9.59)$$

Площадь поперечного сечения была ранее определена в $1,32 \text{ м}^2$. Длину смоченного периметра p_w можно подсчитать из рис. 9.13, для b и h берутся полученные выше значения.

$$P_w = b + 2f; \quad (9.60)$$

$$\sin \theta = h/f;$$

$$f = h/\sin 30^\circ;$$

$$f = h/0,5;$$

$$f = 2h;$$

$$P_w = b + 2(2h);$$

$$P_w = 0,48\text{м} + 2(2)(0,9\text{м});$$

$$P_w = 4,08 \text{ м}.$$

Отсюда

$$R = A/P = 1,32 \text{ м}^2/4,08 \text{ м};$$

$$R = 0,32 \text{ м}.$$

Подставляя в формулу (9.58), получим

$$v = \frac{1}{0,025} (0,32)^{2/3} (0,0009)^{1/2}.$$

(Уклон дна канала, заданный в процентах, переведен в десятичную величину).

$$v = 40 (0,47) (0,03);$$

$$v = 0,56 \text{ м/с}.$$

Следовательно, скорость в канале равна $0,56 \text{ м/с}$, а не $1,14 \text{ м/с}$, как было принято. Действительный расход воды в канале составит

$$Q = Av,$$

$$Q = 1,32 \text{ м}^2 (0,56 \text{ м/с});$$

$$Q = 0,74 \text{ м}^3/\text{с}.$$

Однако в соответствии с проектным заданием расход должен равняться $1,5 \text{ м}^3/\text{с}$. Поскольку уклон дна канала ограничен топографией местности, остается увеличивать поперечное сечение. Это можно выполнить различными способами, в нашем случае попробуем увеличить ширину канала по дну до $0,75 \text{ м}$.

Во всех случаях смоченный периметр должен быть минимальным, тогда условия, выраженные формулой (9.51), остаются в силе.

$$b = 2h \operatorname{tg} (\theta/2);$$

$$b = 2h \operatorname{tg} 15^\circ;$$

$$b = 0,536h;$$

$$h = b/0,536;$$

$$h = 0,75/0,536;$$

$$h = 1,40 \text{ м}.$$

Поскольку уклон дна канала не изменился, выражение (9.56) может быть использовано для дальнейшего расчета.

$$A = 2,732hb;$$

$$A = (2,732) (1,40) (0,75);$$

$$A = 2,87 \text{ м}^2.$$

Смоченный периметр можно определить по формуле (9.61).

$$P_w = b + 4h;$$

$$P_w = 0,75 + 4 (1,4);$$

$$P_w = 6.35 \text{ м}.$$

Отсюда

$$R = A/P_w = 2,87 \text{ м}^2/6,35 \text{ м} = 0,45 \text{ м}.$$

Теперь, сделав соответствующие подстановки, можно выполнить расчет по формуле Маннинга

$$v = \frac{1}{0,025} (0,45)^{2/3} (0,0009)^{1/2};$$

$$v = 40 (0,59) (0,03);$$

$$v = 0,70 \text{ м/с};$$

$$Q = Av;$$

$$Q = (2,87 \text{ м}^2) (0,7 \text{ м/с});$$

$$Q = 2,01 \text{ м}^3/\text{с}.$$

Полученное значение расхода превышает заданное, равное 1,5 м³/с; следовательно, наиболее подходящая ширина канала должна находиться где-то между значениями 0,75 и 0,48, фигурировавшими в расчете в качестве предположительных. Следуя той же методике подбора,

$$b = 0,67 \text{ м};$$

$$h = b/0,536;$$

$$h = 0,67/0,536;$$

$$h = 1,25 \text{ м};$$

$$A = 2,732hb;$$

$$A = (2,732) (1,25) (0,67);$$

$$A = 2,29 \text{ м}^2;$$

$$P_w = b + 4h;$$

$$P_w = 0,67 + 4 (1,25);$$

$$P_w = 5,67 \text{ м};$$

$$R = 2,29 \text{ м}^2/5,67 \text{ м};$$

$$R = 0,40;$$

$$v = \frac{1}{n} R^{2/3} S^{1/2};$$

$$v = \frac{1}{0,025} (0,40)^{2/3} (0,0009)^{1/2};$$

$$v = 40 (0,54) (0,03);$$

$$v = 0,65 \text{ м/с};$$

$$Q = Av;$$

$$Q = (2,29 \text{ м}^2) (0,65 \text{ м/с});$$

$$Q = 1,48 \text{ м}^3/\text{с}.$$

Поскольку значение $1,48 \text{ м}^3/\text{с}$ весьма близко к заданному $1,5 \text{ м}^3/\text{с}$, на этом расчет можно прекратить и принять за окончательные следующие размеры поперечного сечения трапециoidalного канала:

$$b = 0,67 \text{ м};$$

$$h = 1,25 \text{ м};$$

$$\theta = 30^\circ;$$

$$S = 0,09 \text{ \%}.$$

При расчете открытых каналов многие задачи решаются таким же, как в примере (9.8), методом последовательных приближений. Некоторые задачи можно решать непосредственно. Метод последовательных приближений отнимает много времени. Практический опыт работы помогает сократить количество промежуточных этапов решения такого рода задач. Кроме того, существует много справочников, в которых приводятся значения b , h и S . Такие справочники позволяют существенно сократить время, затрачиваемое на подсчеты.

REFERENCES

- Flow of Fluids Through Valves, Fittings and Pipe (1972) Crane Company Technical Paper No 410 New York.
- Fortier, Smuel and Fred C. Scobey (1926). Permissible Canal Velocities. Transactions of the American Society of Civil Engineers 89: 940—956.
- Frevort, Richard H., Glenn O. Schwab, Talcott W. Edminster, and Kenneth K. Barnes (1962). Soil and Water Conservation Engineering, 3rd printing. Wiley, New York.
- Horton, Robert E. (1916). Some Better Kuttler's Formula Coefficients. Engineering News 75: 373—374.
- Israelsen, Orson W. and Vaughn E. Hansen (1962). Irrigation Principles and Practices, 3rd ed. Wiley, New York.
- King, Horace W., Chester O. Wisler, and James G. Woodburn (1948). Hydraulics, Wiley, New York.
- Merkel, James A (1974). Basis Engineering Principles. AVI, Westport, Conn.
- Moody, Lewis F. (1944). Friction Factors for Pipe Flow. Transactions of the American Society of Mechanical Engineers 66: 671—678.
- Ree, W. O. (1949). Hydraulic Characteristics of Vegetation for Vegetated Waterways. Agricultural Engineering 30 (4): 184—187, 189.
- Streeter, Victor L, (1962). Fluid Mechanics, McGraw—Hill, New York.

Глава 10. УСТРОЙСТВА ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ РАСХОДА И УРОВНЯ ЖИДКОСТИ

В этой главе рассмотрены различные устройства для регулирования массового расхода и уровня жидкости в трубопроводах и резервуарах. Оба параметра имеют важное значение для хозяйств

аквакультуры. Основное внимание уделено методам контроля параметров систем водоснабжения. Другие вопросы, в частности преобразование сигналов датчиков в показания измерительных приборов, здесь не рассматриваются, поскольку им посвящена специальная литература, здесь же описаны лишь наиболее распространенные и простые системы контроля.

УСТРОЙСТВА ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ УРОВНЯ

На предприятиях аквакультуры широко используются различные устройства для автоматического регулирования уровня жидкости (обычно это соленая или пресная вода) в резервуарах, бассейнах и других емкостях. Выходной сигнал прибора может восприниматься как предупреждение о возможной аварии, либо служит непосредственно для регулирования подачи жидкости. Так, поместив в трубопровод уровнемер, соединенный с сигналом тревоги, можно вовремя получить информацию о неисправности в системе водоснабжения. Поплавковый уровнемер, установленный в резервуаре для выращивания водных организмов, будет автоматически поддерживать в нем постоянный уровень жидкости.

Поплавковые уровнемеры. Плаваемость физического тела — разность между его весом и весом жидкости, объем которой равен объему этого тела. Чтобы плавающее тело погрузилось в воду, к нему должна быть приложена сила, превышающая силу его плавучести. Именно на этом принципе основано действие устройств, способных воспринимать изменение уровня жидкости в резервуаре или поддерживать этот уровень постоянным. На рис. 10.1 показана схема широко распространенного поплавкового уровнемера. При повышении уровня воды в резервуаре поднимается рычаг, соединенный с поплавком. Как только уровень воды поднимается до контрольной отметки, контакты электрического выключателя размыкаются и отключают насос. Уровень воды начинает снижаться и падает до тех пор, пока снова не замкнутся контакты электрического выключателя и не включится насос. Другой вариант этого устройства — поплавковый клапан, в нем выключатель заменен контрольным клапаном. Примером поплавкового клапана может служить клапан туалетного бачка. Регулирование силы закрытия клапана или силы, замыкающей контакты электрического выключателя

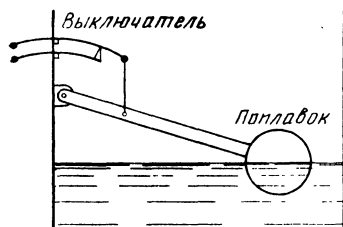


Рис. 10.1. Принципиальная схема устройства для регулирования уровня жидкости поплавкового типа

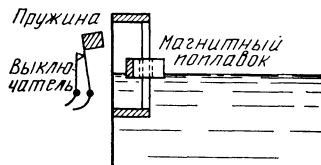


Рис. 10.2. Схема поплавкового регулятора уровня с магнитным выключателем

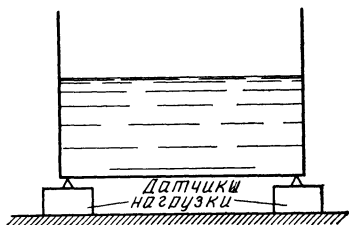


Рис. 10.3. Динамический измеритель уровня воды

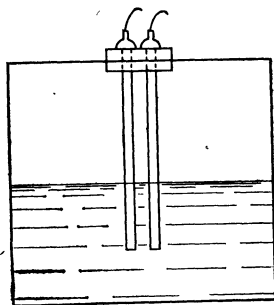


Рис. 10.4. Схема электрического уровнемера

чателя, осуществляется изменением длины рычага, соединяющего клапан или выключатель с поплавком, а также подбором размера или плавучести поплавка.

На рис. 10.2 показан еще один вариант поплавкового уровнемера. Его можно применять, если резервуар выполнен из немагнитного материала. Поплавок скользит вдоль стержня вверх и вниз, реагируя на изменение уровня воды. Размыкание контактов электрического выключателя происходит в тот момент, когда магнит поплавка оказывается на одном уровне с брусочком, выполненным из магнитного материала и расположенным на конце рычажка электрического выключателя. При понижении уровня воды сила магнитного притяжения между магнитом поплавка и металлическим брусочком уменьшается. Когда она станет меньше усилия пружины, оттягивающей рычажок выключателя, контакты электрического выключателя замыкаются и приводят в действие насос. Известно множество других типов поплавковых уровнемеров.

Динамические уровнемеры. На рис. 10.3 показан уровнемер, действие которого основано на принципе измерения веса резервуара, в котором он установлен. Под дном резервуара установлены динамические датчики, измеряющие его вес. Зная вес пустого резервуара, его размеры и плотность жидкости, уровень жидкости можно определить по следующей формуле:

$$\begin{aligned} (abh)(\gamma) + W_0 &= W; \\ h &= (W - W_0)/(ab)\gamma, \end{aligned} \quad (10.1)$$

где h — высота резервуара, м; W — вес резервуара с жидкостью, Н; W_0 — вес пустого резервуара, Н; a, b — размеры поперечного сечения резервуара; γ — удельный вес жидкости, Н/м³.

Хотя этот метод может быть использован для контроля уровня в любых резервуарах, для крупных резервуаров он оказывается сложным и дорогостоящим, а для прудов непрактичным. Преимуществом приборов этого типа является отсутствие контакта между датчиком и жидкостью, что важно при работе с коррозионно-

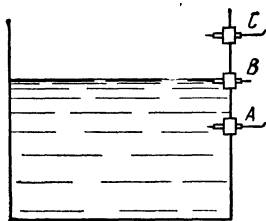


Рис. 10.5. Схема электрического уровнемера с дискретным выходным сигналом

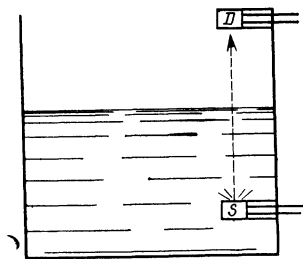


Рис. 10.6. Схема оптического измерителя уровня с аналоговым выходным сигналом

активными жидкостями, например с соленой водой. Кроме того, динамические датчики относительно недороги.

Электрические уровнемеры. В основе действия электрических уровнемеров положено явление электропроводности. На рис. 10.4 и 10.5 представлены наиболее распространенные приборы такого типа. В устройстве на рис. 10.4 два электрода опущены в резервуар почти до дна. Количество электричества, проходящее между электродами, пропорционально глубине, на которую они опущены. Таким образом, величина выходного сигнала прибора прямо пропорциональна длине погруженной части электродов. Внешняя контрольная электрическая цепь, в которой датчик играет роль переменного сопротивления, настраивается на два значения тока — максимальное и минимальное, соответствующие двум отметкам — максимально и минимально допустимым уровням жидкости в резервуаре. Если появляется необходимость изменить контрольный уровень, необходимо перенастраивать внешнюю электрическую цепь. Для этого достаточно заново отрегулировать шкалу контрольного прибора.

Схема, показанная на рис. 10.5, состоит из трех электродов, установленных на боковой поверхности резервуара на трех разных уровнях. Сила тока на участках цепи между электродами A и B и между электродами B и C измеряется отдельно. Как только уровень воды опустится ниже отметки, на которой установлен электрод B, электрическая цепь между электродами A и C прерывается. Это повлечет за собой включение устройства, подающего воду в резервуар (т. е. насоса). Насос будет работать до тех пор, пока не замкнется электрическая цепь на участке между электродами B и C, т. е. пока уровень воды не поднимется выше отметки, на которой установлен электрод C. С этого момента подача воды прекращается. Когда уровень воды снова опустится ниже отметки, на которой установлен электрод B, т. е. разорвется электрическая цепь между электродами A и C, насос снова включается. Таким образом, колебания уровня жидкости в резервуаре ограничены по высоте двумя крайними отметками, на которых установлены датчики B и C. В соответствии с дискретным характером работы этих

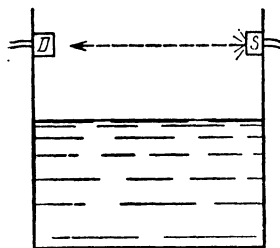


Рис. 10.7. Схема оптического датчика уровня с дискретным выходным сигналом

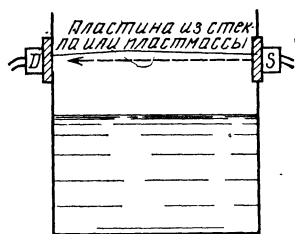


Рис. 10.8. Схема установки оптического датчика уровня с негерметизированным источником света и приемником

приборов электрические цепи будут периодически замыкаться и размыкаться.

Уровнемеры этого типа считаются не слишком дорогими, хотя они и несколько дороже поплавковых уровнемеров, что связано главным образом с необходимостью устройства внешней электрической цепи. Кроме того, поскольку электроды должны все время находиться в непосредственном контакте с жидкостью, могут возникнуть дополнительные проблемы при работе с соленой водой. В этом случае следует применять электроды из платины или любого другого коррозионностойкого материала.

Оптические светочувствительные уровнемеры. Приборы такого типа могут быть как непрерывного, так и дискретного действия (т. е. по принципу «есть сигнал — нет сигнала»). Оптический датчик уровня, показанный на рис. 10.6, относится к датчикам непрерывного действия. Система состоит из источника света *S*, расположенного ниже предельной нижней отметки уровня жидкости, и фотоэлектрического детектора *D*, установленного над уровнем жидкости. Назначение фотодетектора — воспринимать свет, интенсивность которого прямо пропорциональна высоте водяного столба над источником света. Выходной импульс детектора (это может быть величина тока или напряжения), пропорциональный интенсивности света, поступает во внешнюю электрическую цепь, которая включает или отключает насос в соответствии с изменениями уровня жидкости. Естественно, жидкость в этой системе не может быть непрозрачной.

Если фотодетектор и источник света установлены на одном уровне (рис. 10.7), система будет выдавать дискретный сигнал по принципу «есть сигнал — нет сигнала». Когда уровень жидкости опустится настолько, что станет ниже отметки, на которой находится фотодетектор, подаваемый им выходной импульс будет означать «есть сигнал». По мере повышения уровня жидкости и погружения фотодетектора в воду будет уменьшаться количество света, попадающего на фотодетектор, который в этом случае начнет подавать импульс «нет сигнала». Работа такой оптической сис-

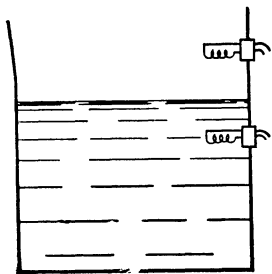


Рис. 10.9. Схема резисторного измерителя уровня

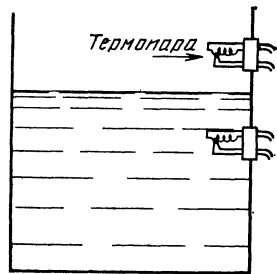


Рис. 10.10. Схема измерителя уровня, работающего на постоянном токе

темы не зависит от прозрачности жидкости при условии, однако, что жидкость не закрывает ни источник света, ни детектор.

Считается, что оптические датчики относительно недороги и достаточно надежны, однако во избежание коротких замыканий необходима тщательная герметизация как источника света, так и детектора. Кроме того, некоторые сложности связаны с введением в конструкцию внешней электрической цепи.

Иногда оптический датчик и источник света помещают с наружной стороны резервуара (рис. 10.8). Это исключает необходимость герметизации фотодетектора и источника света. Кроме того, при таком исполнении появляется возможность упростить конструкцию системы и обеспечить удобство в эксплуатации.

Тепловые уровнемеры. На рис. 10.9 и 10.10 показаны уровнемеры, принцип действия которых основан на использовании явления теплопередачи. На рис. 10.9 изображен датчик, состоящий из витка проволоки или другого теплочувствительного материала, электрическое сопротивление которого изменяется с изменением температуры. Через этот элемент пропускается ток достаточной величины, которым элемент нагревается до температуры, превышающей температуру окружающей среды. Пока уровень воды ниже отметки, на которой установлен датчик, температура элемента остается неизменной. При погружении элемента в воду его теплопотери существенно увеличиваются, температура элемента снижается и остается уже на этом уровне. Поскольку электрическое сопротивление материала датчика изменяется с изменением температуры (в данном случае прибор настроен на два значения температуры, соответствующие двум крайним отметкам уровня), сила электрического тока, проходящего через виток проволоки, также будет изменяться. Следовательно, будут изменяться и электрические параметры внешней электрической цепи, которая включает или отключает насос или какое-либо другое устройство в соответствии с изменениями уровня жидкости в резервуаре.

Как показано на рис. 10.9, в схеме предусмотрена установка двух теплочувствительных датчиков на разной высоте: один датчик подает сигнал только на включение, другой — только на отключение насоса. Такое конструктивное решение позволяет избе-

жать срабатывания пускателя насоса при незначительном изменении уровня жидкости в резервуаре.

Принцип работы датчика, показанного на рис. 10.10, также основан на явлении теплопередачи. Однако в отличие от предыдущей схемы сила тока, пропускаемого через элемент датчика, остается неизменной независимо от уровня жидкости в резервуаре. В непосредственном контакте с нагреваемым элементом датчика находится термопара (устройство, чувствительное к изменению температуры), которая воспринимает изменение температуры элемента. Температура элемента, погруженного в воду, ниже его температуры на воздухе. Следовательно, выходной сигнал термопары даст информацию об уровне жидкости в резервуаре, который может быть выше или ниже точки установки датчика. Сигнал термопары поступает во внешнюю электрическую цепь и производит включение или отключение насоса, клапана или какого-либо другого устройства. Так же как в схеме, показанной на рис. 10.9, ниже расположенный датчик (см. рис. 10.10) подает сигнал только на включение, а выше расположенный датчик — только на выключение насоса. Таким образом, уровень жидкости в резервуаре будет колебаться между двумя отметками, на которых установлены датчики. Необходимая точность регулирования уровня жидкости достигается выбором расстояния между датчиками. В то же время при определении этого расстояния обязательно учитывается условие минимального количества включений и отключений насоса или другого устройства. Чтобы обеспечить выполнение этого условия, датчики следует размещать как можно дальше друг от друга.

Выпуск реагирующих на изменение уровня жидкости тепловых приборов хорошо освоен промышленностью. Они удобны в эксплуатации, однако считаются более дорогими по сравнению с поплавковыми уровнемерами, так как в отличие от последних требуют дополнительных затрат на устройство внешней электрической цепи.

Гидростатические уровнемеры. В качестве уровнемеров могут быть использованы приборы для измерения давления, так как давление в резервуаре и уровень жидкости в нем связаны выражением

$$P = \gamma h, \quad (10.2)$$

где P — давление, Па; γ — удельный вес, Н/м³; h — высота столба жидкости, м.

В схеме, показанной на рис. 10.11, для измерения уровня жидкости в резервуаре используется мембрана, соединенная с тензосенсором, показания которого являются выходными сигналами этого прибора. Разумеется, возможны и другие технические решения. По мере увеличения высоты столба жидкости возрастает давление на мембрану, которая под действием этого давления прогибается и в свою очередь воздействует на соединенный с ней тензосенсор. Электрические характеристики тензосенсора соответственно изменяются. Напряжение внешней электрической цепи, в которой тензосенсор играет роль переменного сопротивления, также изменяется.

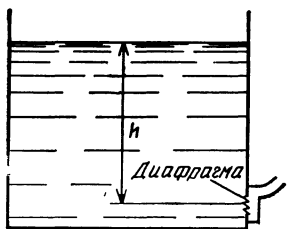


Рис. 10.11. Схема установки датчика давления для измерения уровня

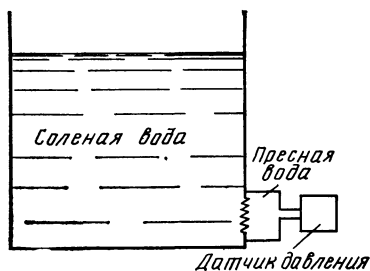


Рис. 10.12. Способ изоляции датчика давления от коррозионно-активной соленой воды

Таким образом, выходной сигнал прибора по напряжению пропорционален уровню жидкости в резервуаре. Несмотря на непрерывный характер выходного сигнала этого прибора, соответствующей настройкой внешней электрической цепи можно обеспечить периодическое включение и отключение насоса или другого устройства, подающего воду.

Промышленностью выпускаются датчики давления самых разнообразных конструкций, рассчитанные на широкий диапазон воспринимаемых нагрузок. Стоимость датчика определяется рядом факторов: конструкцией, точностью прибора и величиной воспринимаемой нагрузки, так как в основу метода определения уровня положен непосредственный контакт между жидкостью и диафрагмой. Применение гидростатических уровнемеров в системах водоснабжения, использующих соленую воду, связано с необходимостью защиты от коррозии. Существуют различные способы защиты мембраны от коррозионно-агрессивных жидкостей, один из которых показан на рис. 10.12. В данном случае для обеспечения нормальной работы прибора необходимо только, чтобы в промежуточной камере с пресной водой отсутствовал воздух.

На рис. 10.13 показана еще одна конструкция с использованием

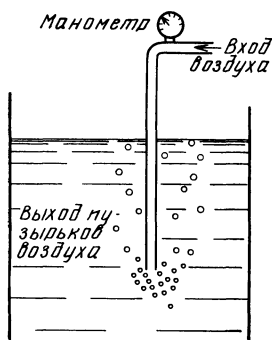


Рис. 10.13. Использование сжатого воздуха для измерения уровня жидкости

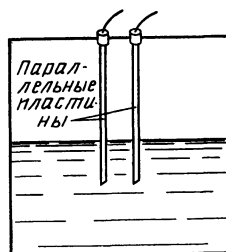


Рис. 10.14. Схема емкостного измерения уровня

сжатого воздуха. Воздух нагнетается компрессором в вертикальную трубку, опущенную одним концом в воду, причем расстояние от дна резервуара до конца этой трубки заранее известно. С помощью манометра, установленного на трубке, измеряется давление нагнетаемого воздуха. Зависимость между измеряемым давлением и высотой столба жидкости (от нижнего конца трубки до верхнего уровня жидкости) выражается формулой (10.2). Уровень жидкости в резервуаре определяется как сумма показаний манометра и константы, равной расстоянию от нижнего конца воздухоподводящей трубки до дна резервуара. Такая система достаточно надежна и обеспечивает необходимую точность измерения, однако для ее работы необходим постоянный источник сжатого воздуха.

Емкостные уровнемеры. Вода характеризуется высокой диэлектрической постоянной, на этом свойстве основано действие приборов, чувствительных к изменению уровня жидкости. Схема одного из них показана на рис. 10.14. Датчик состоит из двух изолированных пластин, подвешенных вертикально в резервуаре и параллельных друг другу. Емкость такого конденсатора пропорциональна диэлектрической постоянной среды, находящейся между пластинами. Поскольку диэлектрическая постоянная воды примерно в 80—85 раз больше диэлектрической постоянной воздуха (в зависимости от температуры), емкость конденсатора с повышением уровня воды значительно возрастает. Реагируя на изменение емкости, внешняя электрическая цепь выдает соответствующий по напряжению выходной сигнал.

Выпускаемые промышленностью емкостные уровнемеры обеспечивают необходимую точность измерения уровня жидкости. Выходной сигнал емкостного датчика может быть как непрерывным, так и дискретным в зависимости от конструкции самого датчика или схемы внешней электрической цепи.

Пьезометрические уровнемеры. Затухание колебаний вибрирующего элемента также может быть использовано для измерения уровня жидкости. Если вибрирующий стержень опустить в резервуар, то частота его колебаний в воздушной среде будет существенно отличаться от частоты, с которой он будет колебаться, когда окажется в воде. В качестве вибрирующего элемента можно использовать пьезоэлектрический элемент или магнитостриктор. Обычно колебательная система состоит из двух датчиков, расположенных на стенке резервуара в определенных точках. Выходной сигнал вышерасположенного датчика выключает насос. Срабатывание нижерасположенного датчика свидетельствует о том, что в резервуар надо подавать воду.

Акустические уровнемеры. Для контроля уровня жидкости можно использовать также и звуковые волны, как правило, в диапазоне ультразвуковых частот (от 20 до 100 кГц). В акустической системе, изображенной на рис. 10.15, генератор звуковых колебаний и приемник установлены в крышке закрытого резервуара. Генератор звуковых колебаний посылает звуковые волны на поверх-

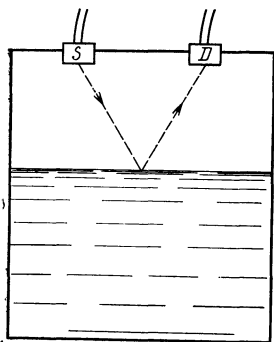


Рис. 10.15. Акустический измеритель уровня жидкости с непрерывным выходным сигналом

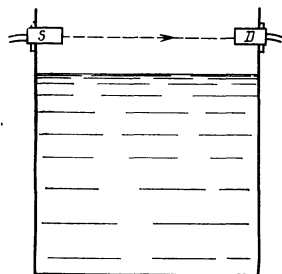


Рис. 10.16. Акустический измеритель уровня жидкости с дискретным выходным сигналом

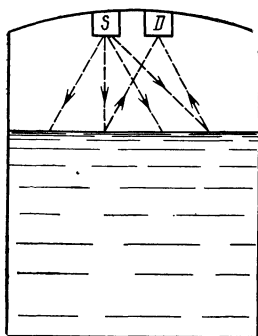


Рис. 10.17. Резонансный измеритель уровня жидкости

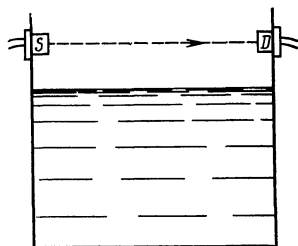


Рис. 10.18. Радиоактивный измеритель уровня жидкости

ность воды. Отраженные от поверхности воды, они воспринимаются ультразвуковым приемником. Время, которое потребуется для того, чтобы звук прошел расстояние от генератора звуковых колебаний до поверхности воды и обратно к приемнику, является критерием для оценки уровня жидкости. Можно установить генератор звуковых колебаний и приемник на дне резервуара, тогда звук будет проходить через жидкость. В некоторых акустических системах генератор и приемник звуковых волн выполняются в общем корпусе.

Акустический датчик с дискретным выходным сигналом, показанный на рис. 10.16, отличается тем, что генератор и приемник звуковых колебаний находятся на противоположных стенках резервуара, звуковые волны распространяются в горизонтальной плоскости. При этом в зависимости от среды, через которую проходят звуковые волны (воздух или вода), приемник будет полу-

чать различную информацию. На этом различии основывается метод измерения уровня жидкости.

Акустический принцип положен в основу действия прибора, схема которого изображена на рис. 10.17. В таких уровнемерах, называемых резонансными, в качестве источника акустических колебаний применен генератор звука переменной частоты, смонтированный на одном уровне с приемником в крышке резервуара. Генератор обеспечивает колебания заданной частоты, а приемник улавливает частоту собственных колебаний полости, заполненной воздухом. Поскольку частота собственных колебаний полости зависит от уровня жидкости, остается только установить характер этой зависимости и найти для нее числовое выражение. Применение резонансных уровнемеров ограничено, поскольку полостной резонанс, лежащий в основе этого метода, возникает только в закрытых сосудах или резервуарах.

Радиоизотопные уровнемеры. Принцип действия радиоизотопных уровнемеров основан на изменении интенсивности γ -лучей при их прохождении через вещества различной плотности, которое происходит при смещении границы раздела двух сред (контролируемого уровня). В качестве источника γ -излучения используются такие элементы, как ^{137}Cs , ^{60}Co или ^{226}Ra . α - и β -излучения для большинства существующих систем контроля за уровнем жидкости не обладают достаточной глубиной проникновения в жидкость, за исключением, возможно, системы, показанной на рис. 10.18, обеспечивающей дискретный выходной сигнал.

В схеме, показанной на рис. 10.18, датчик и приемник установлены на противоположных стенках резервуара. На своем пути от источника к приемнику радиационное излучение проходит через воздух, пока уровень воды не достигнет отметки, на которой установлены оба прибора. Воздушная среда обеспечивает слабое затухание радиации. Как только уровень воды поднимается выше этой отметки и датчик вместе с детектором окажется под водой, излучение должно будет проходить сквозь толщу воды. Во втором случае влияние среды, через которую проходит излучение, будет отражаться на его интенсивности значительно заметнее, так как более плотная жидкость поглощает радиацию сильнее, чем воздух. Неодинаковая интенсивность γ -излучения на пути между излучателем и приемником регистрируется внешней электрической цепью, которая соответствующим образом реагирует на изменение уровня жидкости.

Схема контроля, показанная на рис. 10.19, характеризуется тем, что ее выходной сигнал прямо пропорционален уровню жидкости, причем эта зависимость остается постоянной при любом уровне жидкости. В данном случае ослабление радиации в воздушной среде незначительно по сравнению с ее ослаблением в жидкости. Таким образом, по мере повышения уровня жидкости приемник излучения регистрирует постепенное ослабление интенсивности радиации.

Радиоизотопные уровнемеры освоены промышленностью и име-

ют отличные эксплуатационные качества. Для обеспечения безопасности персонала, работающего с радиоактивными приборами, должны быть приняты соответствующие меры предосторожности. Стоимость приемников излучения часто оказывается выше стоимости датчиков других типов. В системах по разведению водных организмов рабочей жидкостью является всегда пресная или соленая вода. Поскольку почти все датчики могут нормально работать с такими жидкостями, при выборе приборов в первую очередь принимается во внимание их цена.

Выше были кратко описаны наиболее распространенные приборы для контроля уровня жидкости. Схемы внешней электрической цепи, воспринимающей выходные сигналы датчиков, не рассматривались. Промышленность выпускает слишком много приборов для измерения уровня, чтобы их можно было все описать. Выбирая тип датчика так же, как и конструкцию внешней электрической цепи, необходимо консультироваться непосредственно с заводами-изготовителями. Как правило, чем выше требования к чувствительности приборов и чем активнее среда, в которой они работают, тем выше их стоимость.

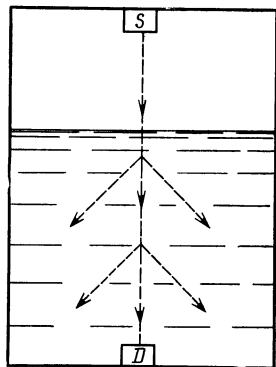


Рис. 10.19. Радиоактивный измеритель уровня жидкости с выходным сигналом аналогового типа

ПРИБОРЫ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ РАСХОДА ЖИДКОСТИ

Вода на предприятиях по разведению водных организмов обычно пропускается либо по закрытым трубопроводам, либо по открытым каналам, причем объемы воды довольно значительны. Затраты на подачу воды непосредственно зависят от объема перемещаемой жидкости и полного напора системы, создаваемого насосами. Чтобы избежать лишних перемещений воды, необходимо точно знать, какое количество воды идет по трубопроводам и какое количество воды должно идти. Ниже изложены различные методы определения расхода воды.

Различные приборы для измерения расхода можно классифицировать по разным признакам. В этой книге принята следующая классификация устройств для прямого измерения: расходомеры переменного перепада давления; расходомеры постоянного перепада давления; разные расходомеры; счетчики для измерения расхода в открытых каналах.

Устройства для прямого измерения расхода. Простейшим устройством для прямого измерения расхода жидкостей является мерный сосуд в комплекте с секундомером. До начала наполнения мерного бака поток в трубе или в открытом канале должен стабилизироваться, на это требуется несколько секунд после откры-

тия задвижки. С помощью секундомера устанавливают промежуток времени, необходимый для наполнения мерного бака. На основании полученных данных определяют расход жидкости. При всей своей простоте описанный способ обеспечивает вполне приемлемую точность измерения. Тем не менее величина погрешности при измерении объема поступившей жидкости будет зависеть от объема мерного бака и относительной скорости потока. Так, если 10-литровый бак наполняется водой, поступающей со скоростью 200 л/мин, то он заполняется очень быстро, поэтому измерение расхода за очень короткие промежутки времени связаны с ошибками, допускаемыми при включении и выключении секундомера. В то же время, если расход жидкости невелик по сравнению с объемом мерной емкости, время ее наполнения будет больше. Тогда доля потерь времени на включение и выключение секундомера будет мала по сравнению со временем заполнения мерной емкости. В этом случае погрешность при измерении уменьшается.

Объемные счетчики. Для прямых измерений объема применяют объемные счетчики. По принципу измерения их можно разделить на две группы: в счетчиках первой группы поступившая жидкость измеряется отдельными дозами, равными по весу; в счетчиках второй группы — отдельными дозами, равными по объему. Число доз, вытесненных счетчиком за определенный промежуток времени, суммируется. На основании полученных данных определяют расход. Так, количество жидкости, пропущенной через счетчик, работающий по объемному принципу, подсчитывается по формуле

$$Q = Vn,$$

где Q — количество жидкости, пропущенной через счетчик за одну минуту; V — объем мерной камеры счетчика; n — число доз, вытесненных счетчиком за минуту.

Если счетчик работает по весовому принципу, массовый расход определяется по формуле

$$W = \gamma Qn,$$

где W — вес жидкости, пропущенной через счетчик за одну минуту; γ — удельный вес жидкости; Q и n — те же, что в предыдущей формуле.

Объемный счетчик с опрокидывающимися камерами, работающий по принципу подсчета весовых доз (рис. 10.20), состоит из двух камер, расположенных одна над другой, причем входное отверстие для поступления воды устроено над верхней камерой. Жидкость поступает в счетчик, наполняет верхнюю камеру и начинает переливаться в нижнюю. Наполнение нижней камеры продолжается до тех пор, пока центр тяжести не сместится настолько, что камера потеряет равновесие и опрокинется. При этом накопившаяся вода сливается. После полного опорожнения счетчик занимает исходное положение. Во время опрокидывания верхняя камера заполняется водой и подает ее в нижнюю, когда последняя занимает исходное положение.

Поршневой счетчик (рис. 10.21) относится к объемным счетчи-

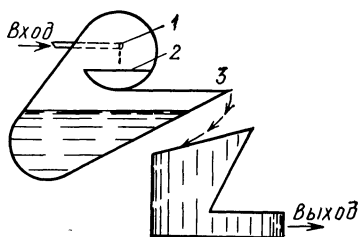


Рис. 10.20. Схема счетчика с опрокидывающимися камерами (Ескман, 1950):

1 — ось поворота; 2 — верхняя камера;
3 — нижняя камера

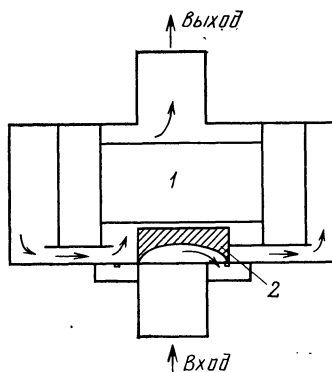


Рис. 10.21. Схема поршневого счетчика (Ескман, 1950):

1 — поршень; 2 — золотник

кам с принудительным вытеснением жидкости и работает следующим образом. Вода поступает через входное отверстие в камеру, расположенную справа от поршня. Поршень начинает перемещаться влево, вытесняя при этом жидкость, накопившуюся в камере, расположенной слева от поршня. Не доходя до крайнего левого положения, поршень сдвигает клапан, через который жидкость перетекает в камеру, лежащую слева от поршня, в то же время отверстие, соединяющее эту камеру с выходным отверстием прибора, закрывается. Поскольку давление воды теперь воздействует на поршень с левой стороны, он движется вправо, вытесняя воду из правой камеры через выходное отверстие наружу. Не доходя до своего крайнего правого положения, поршень сдвигает клапан золотника вправо, в результате чего открывается отверстие, соединяющее входной патрубок с правой камерой. За один цикл работы поршень вытесняет из прибора определенный объем жидкости. Число перемещений поршня суммируется отсчетным механизмом, а количество жидкости пропущенной через прибор, определяется умножением числа циклов на объем жидкости, вытесняемой за один цикл работы поршня. В промышленности применяются счетчики не с одним, а с несколькими поршнями, совершающими возвратно-поступательное движение, чем обеспечивается более плавная работа. Точность показаний прибора зависит от величины утечки жидкости между стенкой измерительной камеры и рабочим органом. Эта утечка оказывает большое влияние на погрешность показаний счетчика. Если ее устранить, объемные счетчики с цилиндрическими поршнями работают с высокой точностью, погрешность может составлять всего 0,2—0,3 % (Ескман, 1950). Поскольку счетчики этого типа работают на принципе измерения объема, плотность и вязкость жидкости практически не оказывают влияния на точность измере-

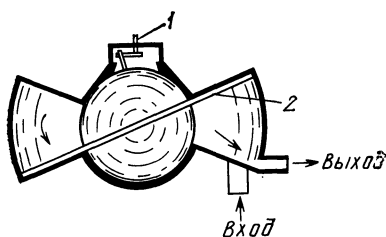


Рис. 10.22. Счетчик с дисковым поршнем (Еckman, 1950):
1 — приводной вал; 2 — диск

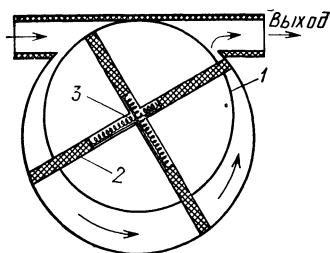


Рис. 10.23. Ротационный счетчик (Еckman, 1950):
1 — эксцентричный барабан; 2 — лопасть;
3 — пружина

ний. Счетчики с возвратно-поступательно движущимися поршнями применяются в различных системах водоснабжения с массовым расходом от 37 до 3785 л/мин. Тем не менее их применение ограничено специальными требованиями к жидкости, которая не должна быть коррозионно-активной и слишком вязкой (Еckman, 1950).

Счетчик с дисковым поршнем. Для измерения количества жидкости, протекающей через систему, широко применяются счетчики с дисковым поршнем (рис. 10.22). Широкое распространение этих счетчиков в качестве водомеров объясняется простотой конструкции, компактностью и относительно низкой стоимостью. В центре счетчика в сферическое гнездо установлен шар, на котором закреплен плоский диск. Во время работы счетчика шар вместе с диском покачивается в сферическом гнезде вокруг общего геометрического центра, но не проворачивается. Под действием давления жидкости, поступающей через входное отверстие в прибор, диск опускается или поднимается в зависимости от его положения относительно входного патрубка. При протекании жидкости через камеру счетчика плоскость диска смещается вдоль стенок и шар вместе с диском поворачивается в своем гнезде. Под действием разности давлений во входном и выходном патрубках вода обтекает шар с диском и направляется к выпускному патрубку. Во время движения шара выступ на его верхней части перемещается по поверхности конуса, вершина которого совпадает с центром шара. Поскольку входной и выпускной патрубки разделены перегородкой (на рис. 10.22 не показана), вода должна поступать через впускной патрубок и вокруг шара, все время оставаясь под диском. Ось диска приводит в действие счетный механизм, регистрирующий число перемещений шара с диском. Это число, умноженное на объем вытесняемой за один цикл жидкости, позволяет определить объем жидкости, прошедшей через прибор. Описанные счетчики могут работать при любых значениях давления и температуры измеряемой среды. Однако на точность показаний могут влиять плотность и вязкость жидкости, поскольку в приборах этой конструкции возможны утечки жидкости через зазоры. При расходах от 55 до 1890 л/мин относительная

погрешность счетчиков с качающимся диском обычно не превышает 1%.

Ротационный счетчик с прямыми лопастями. Принципиальная схема ротационного счетчика с прямыми лопастями показана на рис. 10.23. Основным элементом прибора является установленный эксцентрично в корпусе ротор, снабженный лопастями. При вращении ротора лопасти под действием пружин всегда остаются прижатыми к внутренней поверхности корпуса. Протекая через счетчик, жидкость давит на лопасти и приводит во вращение ротор, который в свою очередь перегоняет жидкость к выходному патрубку. Число оборотов ротора фиксируется и определяет объем жидкости, пропущенной через счетчик. Плотность и вязкость жидкости не оказывают влияния на точность измерений ротационных счетчиков, так как эта конструкция отличается минимальными утечками измеряемого вещества. Относительная погрешность измерений ротационных счетчиков с прямыми лопастями не превышает 0,2—0,3%.

Расходомеры переменного перепада давления. Среди приборов, применяемых для измерения расходов, широкое распространение получили счетчики, работа которых основана на измерении переменного перепада давления. Такой расходомер измеряет перепад давления, который создается в сужающем устройстве, устанавливаемом в трубопроводе, и преобразует его в значения расхода. Схема протекания жидкости через суженное сечение показана на рис. 10.24. Согласно уравнению Бернулли (10.3) с увеличением скорости потока статическое давление жидкости в трубопроводе уменьшается при условии, что $Z_1 = Z_2$ (сечения 1 и 2; см. рис. 10.24).

$$Z_1 + P_1/\gamma_1 + v_1^2/2g = Z_2 + P_2/\gamma_2 + v_2^2/2g, \quad (10.3)$$

где Z_1 и Z_2 — нивелировочные высоты в точках 1 и 2; P_1 и P_2 — статическое давление в сечениях 1 и 2; γ_1 и γ_2 — удельный вес жидкости в сечениях 1 и 2; v_1 и v_2 — скорость потока в сечениях 1 и 2; g — ускорение силы тяжести.

Пользуясь уравнением Бернулли и уравнением неразрывности струи, можно установить математическую зависимость между расходом несжимаемой жидкости и перепадом давления:

$$Z_1 + P_1/\gamma + v_1^2/2g = Z_1 + P_2/\gamma + v_2^2/2g. \quad (10.4)$$

Если предположить, что трубопровод горизонтальный и $Z_1 = Z_2$, это уравнение приобретает следующий вид:

$$P_1/\gamma + v_1^2/2g = P_2/\gamma + v_2^2/2g. \quad (10.5)$$

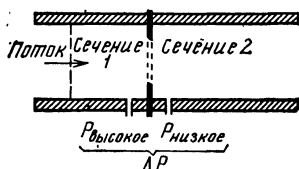


Рис. 10.24. Схема установки в трубопроводе сужающего устройства

Для несжимаемой жидкости можно считать $\gamma_1 = \gamma_2$, а $A_1 v_1 = A_2 v_2$.

$$v_1 = (A_2/A_1) v_2. \quad (10.6)$$

Подставляя выражение (10.6) в уравнение (10.5), после преобразования получим

$$P_1 - P_2 = v_2^2 \gamma / 2g [1 - (A_2/A_1)^2]. \quad (10.7)$$

Решая уравнение (10.7) относительно v_2 , получим

$$v_2 = \frac{\{[2g(P_1 - P_2)]/\gamma\}^{1/2}}{[1 - (A_2/A_1)^2]^{1/2}}. \quad (10.8)$$

Совместное решение уравнений неразрывности струи и (10.8) дает следующее выражение:

$$Q_{\text{ид}} = A_2 v_2 = \frac{A_2}{[1 - (A_2/A_1)^2]^{1/2}} \left[\frac{2g(P_1 - P_2)}{\gamma} \right]^{1/2}. \quad (10.9)$$

Для конкретного счетчика величины A_1 и A_2 имеют определенные значения; поэтому для удобства определяют константу M — модуль сужающего устройства:

$$M = \frac{1}{[1 - (A_2/A_1)^2]^{1/2}}. \quad (10.10)$$

Кроме того, для получения рабочей формулы расхода вводят еще два коэффициента — коэффициент расхода C для данного сужающего устройства и коэффициент потока K .

$$C = Q_d/Q_{\text{ид}}, \quad (10.11)$$

где Q_d — действительное значение расхода жидкости, протекшей через прибор; $Q_{\text{ид}}$ — теоретический (без потерь) расход жидкости, прошедшей через счетчик.

Коэффициент расхода C учитывает потери расхода жидкости в счетчике, а коэффициент потока K представляет собой произведение C на M :

$$K = CM. \quad (10.12)$$

Если в качестве сужающих устройств применяются сопла Вентури, для расчета обычно берут значения коэффициентов C и M . При расчете нормальных диафрагм и сопел применяют коэффициент K (Ескман, 1950). Таким образом формула для практических расчетов сужающих устройств имеет следующий вид:

$$Q = CMA_2(2g/\gamma)^{1/2}(P_1 - P_2)^{1/2}. \quad (10.13)$$

В расходомерах переменного перепада применяются следующие виды сужающих устройств: сопла Вентури; нормальные сопла; нормальные диафрагмы; криволинейные и петлеобразные отрезки труб; трубки Пито.

Сопла Вентури. На рис. 10.25 представлено сопло Вентури типа Гершел. Стандартное сопло Вентури состоит из суживаю-

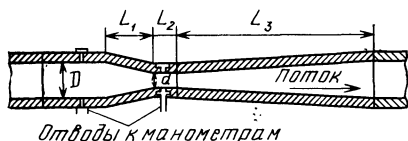


Рис. 10.25. Стандартное сопло Вентури

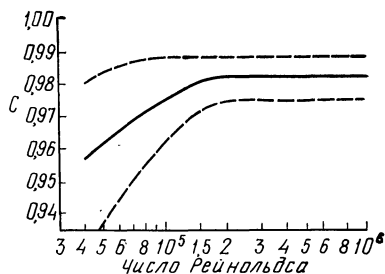


Рис. 10.26. Зависимость коэффициента расхода от числа Рейнольдса для сопел Вентури типа Гершел (ASME Power Test Codes, 1959)

щейся входной части L_1 , средней части, так называемой горловины, L_2 с минимальным поперечным сечением и плавно расширяющейся выходной части L_3 . Профиль входной и выходной частей сопла подбирается таким образом, чтобы потери напора были минимальными. Поскольку через горловину сопла жидкость протекает с максимальной скоростью, статическое давление в суженном сечении будет меньше давления перед сужением. Отбор значений давления осуществляется на участке наибольшего расширения входной части сопла и в горловине. Измеренный перепад давлений преобразуется в значения расхода с помощью уравнения (10.13).

Зная диаметр трубопровода, в котором установлено сопло Вентури, и диаметр горловины сопла, можно подсчитать значение константы M . Коэффициент расхода C обычно берется из таблиц или графика (рис. 10.26), при этом коэффициент расхода определяется как функция числа Рейнольдса. При достаточно больших числах Рейнольдса, начиная со значения $2,5 \cdot 10^5$, коэффициент расхода становится постоянным. Значения C лежат на сплошной линии. Пунктирные кривые ограничивают диапазон значений C . Коэффициенты расхода определены для сопел, устанавливаемых в трубах диаметром 5,08 см и более, и значений β в пределах 0,3—0,75 (β — это соотношение площадей отверстий горловины сопла Вентури и трубопровода). К сожалению, очень мало данных для низких чисел Рейнольдса и для труб диаметром менее 5,08 см. Однако это не является препятствием для широкого применения расходомеров с соплом Вентури и других расходомеров переменного перепада давления, так как в технике измерений расхода теоретический метод применяется чрезвычайно редко. Обычно на практике давление измеряется манометром, а расход, соответствующий каждому перепаду давлений, определяют либо методом прямого измерения объема, либо другим предварительно откалиброванным измерительным прибором. Таким образом получают точки для построения графика зависимости перепада давлений от расхода. При измере-

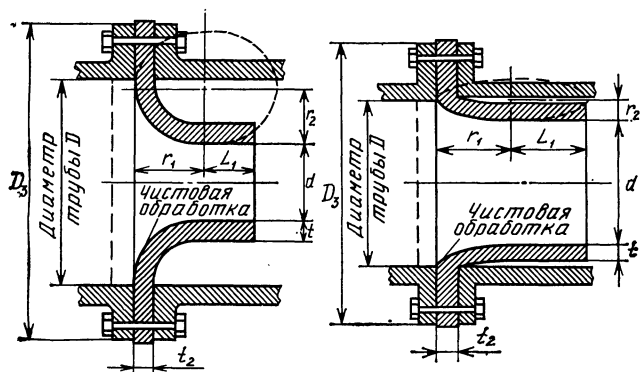


Рис. 10.27. Основные размеры нормальных сопел, профиль входной части которых образуется дугой большого радиуса

нии расхода достаточно определить перепад давлений и по графику найти соответствующее значение расхода.

Нормальные сопла. На рис. 10.27 представлены принципиальные схемы двух нормальных сопел. Нормальные сопла, так же как и сопла Вентури, работают по принципу измерения переменного перепада давления. Поскольку соотношение диаметров входного и выходного отверстий у нормальных сопел больше, они вызывают большую потерю давления по сравнению с соплами Вентури вследствие значительного увеличения турбулентности. Вместе с тем нормальные сопла имеют преимущество по сравнению с соплами Вентури в том отношении, что они требуют меньше места и их можно устанавливать между фланцами трубопроводов.

Обычно отбор давления от нормальных сопел осуществляется в трех точках. При отборе давления с помощью отдельных отверстий в трубопроводе (см. рис. 10.28) точка отбора высокого давления отстоит от входного отверстия сопла на расстоянии, равном

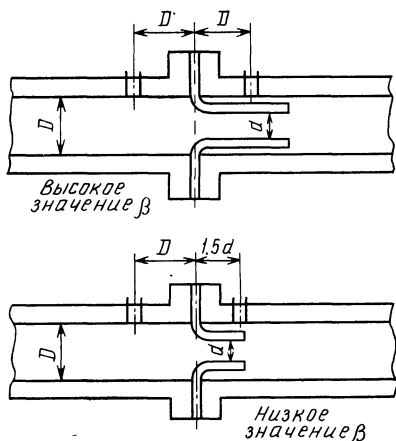


Рис. 10.28. Отбор давления от нормальных сопел с помощью импульсных трубок в стенках трубопровода

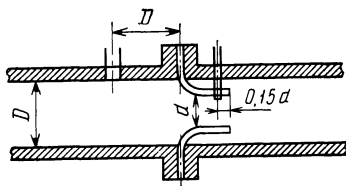


Рис. 10.29. Отбор давления от нормальных сопел через отверстие в горловине

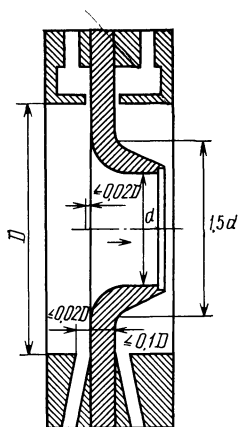


Рис. 10.30. Два способа отбора давления от нормального сопла в месте сопряжения фланца сопла и внутренней поверхности трубопровода: вверх — через кольцевую камеру, вниз — через отверстия в трубопроводе, просверленные под углом (Fluid meters, 1959)

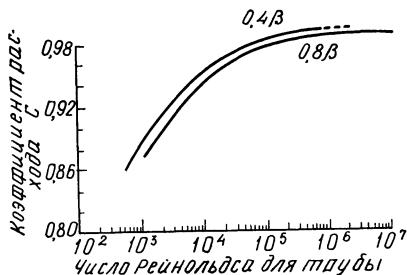


Рис. 10.31. Зависимость коэффициента расхода от числа Рейнольдса для нормальных сопел (ASME Power Test Codes, 1959)

одному диаметру трубопровода, а точка отбора низкого давления берется над выходным отверстием сопла на расстоянии одного диаметра трубопровода от входного отверстия сопла для сопел с высоким значением β ($\beta > 0,25$) или на расстоянии полутора диаметров горловины сопла от входного отверстия сопла для сопел с низким значением отношения β ($\beta < 0,5$). Поскольку вблизи этих мест отбора давление меняется постепенно, неточность установки импульсных трубок в пределах $\pm 0,05$ диаметра трубопровода является вполне допустимой и не оказывает существенного влияния на погрешность показаний.

В нормальном сопле, показанном на рис. 10.29, отверстия для отбора давления просверливаются в горловине сопла. Высокое давление отбирается в точке, отстоящей от входного отверстия сопла на расстояние, равное одному диаметру трубопровода. Отверстие для отбора низкого давления просверлено в стенке горловины сопла на расстоянии $0,15$ диаметра горловины от выходного отверстия сопла. Такой метод отбора давления позволяет контролировать действительное давление внутри камеры сопла. Отверстия, просверленные в горловине сопла, удобны, если сопло сообщается с атмосферой.

На рис. 10.30 показаны два способа отбора давления от сужающего устройства в местах сопряжения фланца сопла и внутренней поверхности трубопровода. На схеме в верхней части рис. 10.30 показана кольцевая камера, сообщающаяся с внутренней полостью трубопровода кольцевой щелью (шириной не более $0,02D$) или несколькими отверстиями, равномерно распре-

ленными по окружности трубопровода. Такое расположение кольцевых камер позволяет просверлить отверстия для импульсных трубок непосредственно через стенку трубопровода. Вторым способом (см. нижнюю часть рис. 10.30) состоит в том, что отверстия для импульсных трубок сверлятся под углом к месту отбора давления. Размеры отверстий и угол наклона выбираются с таким расчетом, чтобы диаметр входной части отверстия после чистовой обработки не превышал 0,02 внутреннего диаметра фланца.

Метод отбора давления через отверстия, просверленные в горловине сопла, применяется сравнительно редко, что объясняется сложностью прокладки соединительных труб между камерой низкого давления и дифманометром. Кроме того, такие измерения предъявляют высокие требования к чистоте поверхности отверстий для отбора давления, так как скорость потока достигает в них максимального значения и малейшие шероховатости могут привести к существенным ошибкам при измерениях давления. Метод отбора давления с помощью импульсных трубок, установленных под углом, характеризуется наибольшей погрешностью по сравнению с другими рассмотренными методами. Кроме того, в этом случае существенную роль играет осевая длина отверстия. Наиболее простым способом является установка импульсных трубок, пропущенных через отверстия в трубопроводе. Именно этот метод отбора давления чаще всего применяется в инженерной практике.

Для определения расхода пользуются формулой (10.14).

$$Q_d = KA_2(2g/\gamma)^{1/2}(P_1 - P_2)^{1/2}. \quad (10.14)$$

Коэффициент расхода C определяют по графику, приведенному на рис. 10.31. График построен для трубопроводов диаметром свыше 5,08 см и нормального сопла, профиль входной части которого образован дугами окружности большого радиуса. При лабораторных измерениях отбор давления производился с помощью импульсных трубок через отверстия, просверленные в стенках трубопровода. Коэффициент K подсчитывают по формуле (10.12).

Теоретический метод определения расхода по формуле (10.14) применяется очень редко. Градуировка нормальных сопел на испытательном стенде производится в таком же порядке, что и градуировка сопел Вентури.

Нормальные диафрагмы. Нормальная диафрагма представляет собой тонкий плоский диск с концентрическим отверстием. Диаметр трубопровода, в котором устанавливается диафрагма, должен быть больше диаметра отверстия диафрагмы (рис. 10.32). Поток жидкости, пропускаемый по трубопроводу, попадает в диафрагму, суживающую его сечение. Поскольку скорость потока в диафрагме больше, чем в трубопроводе, статическое давление в суженном сечении будет меньше давления в трубопроводе перед диафрагмой. Этот перепад давления может быть преобразован в значения скорости или расхода протекающей жидкости.

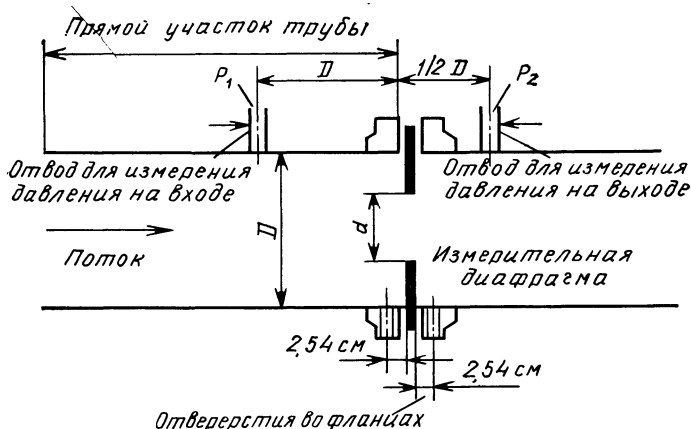


Рис. 10.32. Отбор давления от нормальной концентрической диафрагмы с прямоугольной острой кромкой на входе потока: вверх — в точках, отстоящих от диафрагмы на расстояния D и $1/2 D$ трубопровода, вниз — через отверстия, просверленные во фланцах трубопровода (ASME Power Test Codes, 1959)

Диафрагмы бывают концентрические, эксцентрические и сегментные. В концентрических диафрагмах оси отверстия диафрагмы и трубопровода совпадают. В эксцентрических диафрагмах ось метра, как и диаметр трубопровода. Сегментные и эксцентрические представляют собой сегмент круга приблизительно такого же диаметра, как и диаметр трубопровода. Сегментные и эксцентрические диафрагмы применяются только при особых обстоятельствах, требующих специальных условий (например, полного дренирования трубопровода), поэтому ниже эти диафрагмы не рассматриваются.

Существует пять различных способов отбора давления от нормальных диафрагм.

1. Импульсные трубки подводятся через фланцы. В этом случае ось фланцевого отвода со стороны высокого давления должна находиться на расстоянии 2,54 см от лицевой поверхности диафрагмы, а ось фланцевого отвода со стороны низкого давления — на расстоянии 2,54 см от противоположной поверхности диафрагмы (см. нижнюю часть рис. 10.32).

2. Давление отбирается в точках, отстоящих от диафрагмы на расстояния, равные одному диаметру и половине диаметра трубопровода. Со стороны высокого давления расстояние между осью импульсной трубки и лицевой поверхностью диафрагмы должно быть равно одному диаметру трубопровода, а со стороны низкого давления — половине диаметра трубопровода от той же поверхности диафрагмы. Эти расстояния остаются постоянными при всех значениях (см. верхнюю часть рис. 10.32).

3. Импульсная трубка подводится к суженному сечению потока на кратчайшем расстоянии от обратной поверхности диафрагмы. Высокое давление отбирается в точке, отстоящей от лицевой по-

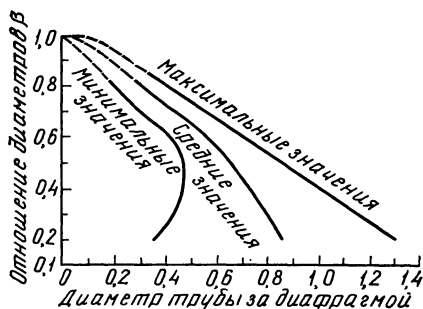


Рис. 10.33. Положение области минимального давления относительно плоскости диафрагмы (Fluid meters, 1959)

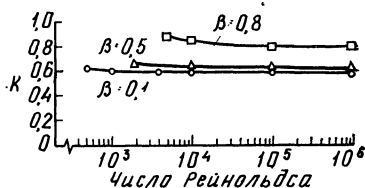


Рис. 10.34. Зависимость коэффициента K от числа Рейнольдса при диаметре трубопровода 5,08 см для случая отбора низкого давления внутри суженного сечения потока (ASME Power Test Codes, 1959)

верхности диафрагмы на расстояние, равное $\frac{1}{2}$ —2 диаметрам трубопровода; обычно это расстояние берется равным одному диаметру трубопровода. Для отбора низкого давления импульсная трубка вводится в суженное сечение потока в точке минимального давления; характер изменения статического давления за диафрагмой выражается кривыми, показанными на рис. 10.33.

4. Импульсные трубки подводятся к местам сопряжения трубопровода с диафрагмой. Давление отбирается как до диафрагмы, так и после нее, в местах соединения внутренней стенки трубопровода с диском диафрагмы. Варианты подведения импульсных трубок при таком способе измерения показаны на рис. 10.30. Для всех видов сужающих устройств эти варианты одинаковы.

5. Импульсные трубки, установленные вдоль трубопровода. В этом случае давление измеряется в тех точках по обе стороны диафрагмы, где поток носит установившийся характер. Фактически таким образом определяется величина невосстанавливаемой потери напора в диафрагме. Давления отбирают на расстоянии $2\frac{1}{2}$ диаметра трубопровода до и 8 диаметров трубопровода после лицевой поверхности диафрагмы. Такой способ отбора давления применяется сравнительно редко, так как измеряемый в этом случае перепад давления в меньшей степени отражает изменения расхода по сравнению с другими перечисленными способами. Отсюда и большая погрешность показаний при измерениях.

Расчетная формула расхода для концентрических диафрагм имеет следующий вид:

$$Q_d = K A_2 (2g/\gamma)^{1/2} (P_1 - P_2)^{1/2}. \quad (10.15)$$

Значения коэффициентов K для всех способов отбора давления (исключая способ отбора с помощью отдельных отверстий в трубопроводе) и при диаметрах трубопроводов от 3,81 до 40,64 см

получены экспериментально (стандарты Американского общества инженеров-механиков, 1959). Зависимость коэффициента K от числа Рейнольдса и соотношения диаметров при номинальном диаметре трубопровода 5,08 см приведена на рис. 10.34.

Соотношение между Q и $P_1 - P_2$ для диафрагмы, работающей в конкретных условиях, может быть определено на испытательном стенде с помощью другого устройства для прямого измерения объема, как это описано выше для сопла Вентури. Полученный при градуировке график зависимости перепада давления $P_1 - P_2$ от расхода Q применяют для практических измерений.

Сравнительный анализ сопел Вентури, нормальных сопел и диафрагм. На рис. 10.35—10.37 приведены построенные по экспериментальным данным кривые распределения статического давления при установке в трубопроводе нормальных сопел, сопел Вентури и нормальных диафрагм. Наибольший перепад давления замечен для диафрагмы, минимальный — для сопла Вентури и средний — для нормального сопла. Чем больше перепад давления, тем больше потери энергии, связанные с вихреобразованием и трением потока о стенки трубопровода. Так, невосстанавливаемые потери давления в сопле Вентури значительно меньше, чем в соплах и диафрагмах. На рис. 10.38 представлены кривые потерь давления для нормальных сужающих устройств, выраженные в процентах от значения перепада давления, в зависимости от β , соотношения диаметров горловины сопла или отверстия диафрагмы и трубопровода. Как и следовало ожидать, для всех видов сужающих устройств потери давления тем меньше, чем больше β , так как по мере увеличения β скорость и турбулентность потока уменьшаются. Приведенные графики показывают также, что потери давления в сопле Вентури значительно меньше, чем в соплах или диафрагмах, что является основным преимуществом сопла Вентури.

Сопла Вентури отличаются высокой точностью измерений и не требуют частой градуировки, как обычные сопла или диафрагмы, так как они более изнosoустойчивы, что особенно важно при работе с жидкостями, содержащими механические примеси. Вместе с тем сопла Вентури требуют значительно больше места для установки и стоят дороже. По стоимости, изнosoустойчивости, характеру распределения статического давления и необходимой длине прямого участка трубопровода нормальные сопла занимают промежуточное место между соплами Вентури и диафрагмами. Важным условием получения хороших результатов является также тщательность установки нормальных сопел в трубопроводах. Диафрагмы относительно просто устанавливаются и не требуют большой длины прямого участка трубопровода, однако они быстро изнашиваются и нуждаются в частой градуировке. Из-за низкой механической прочности они часто выходят из строя при резких изменениях давления. В то же время диафрагмы дешевле всех рассмотренных сужающих устройств, что обусловило их широкое применение.

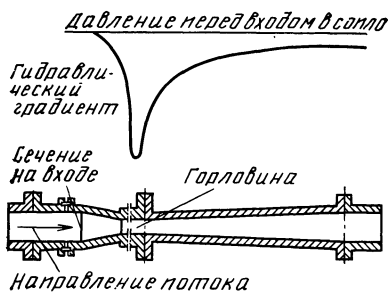


Рис. 10.35. Характер распределения статического давления вдоль сопла Вентури (давление перед соплом равно 1 ат)

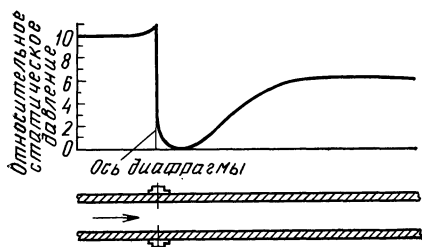


Рис. 10.37. Характер распределения статического давления при установке в трубопроводе нормальной диафрагмы (давление перед диафрагмой 1 ат) (Fluid meters, 1959)

Рис. 10.38. Кривые потерь давления для нормальных сужающих устройств:

А — диафрагма, В — нормальное сопло, С — сопло Вентури с углом конусности диффузора 15° , D — сопло Вентури типа Гершеля (Fluid meters, 1959)

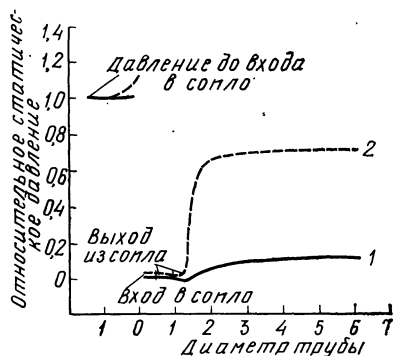
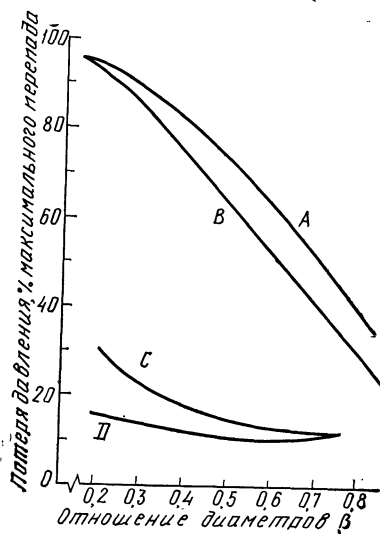


Рис. 10.36. Характер изменения статического давления вблизи нормального сопла (давление перед соплом 1 ат):

1 — $\beta = 0,2464$; 2 — $\beta = 0,8335$ (Fluid meters, 1959)



Центробежные расходомеры. Криволинейные участки трубопровода, в которых проявляется действие центробежных сил в потоке жидкости, также могут быть использованы для измерения расхода. Под действием центробежных сил поток отжимается к внешней стенке криволинейного участка, в связи с этим давление на внешнюю стенку криволинейного участка будет больше, чем на внутреннюю. Разность давлений, измеренная в двух точках сечения потока, может быть преобразована в значения ско-

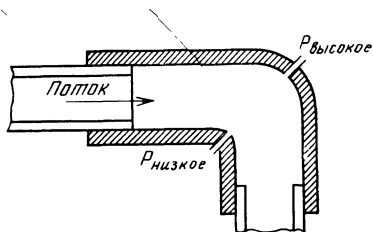


Рис. 10.39. Использование криволинейного участка трубопровода (колена) для установки расходомера, работающего по принципу измерения разности давлений, возникающей от действия центробежных сил

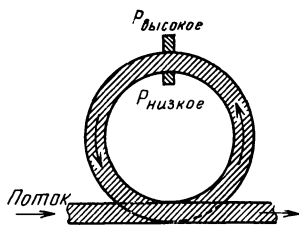


Рис. 10.40. Петлеобразный расходомер

рости. На рис. 10.39 и 10.40 схематически показаны расходомеры, работающие по этому принципу. Один из них выполнен на угловом патрубке трубопровода, а другой представляет собой петлеобразную трубку. Более широкое распространение получил угловой расходомер, так как он проще в изготовлении, никогда не засоряется и может работать длительное время без повторной градуировки с необходимой точностью. Последнее объясняется повышенной износоустойчивостью углового расходомера. Импульсные трубки для отбора давления располагаются вдоль общей оси симметрии криволинейных участков наружной и внутренней стенок углового патрубка (см. рис. 10.39).

Трубки Пито. К расходомерам, работающим по принципу измерения переменного перепада давления, относятся также трубки Пито. Как правило, ими пользуются при измерениях расхода газов, однако допускается применение трубок Пито и при измерениях расхода жидкости. Трубка Пито состоит из двух камер (рис. 10.41) — внутренней и внешней. Внутренняя камера открытым концом обращена навстречу потоку измеряемого вещества; во внешней камере предусмотрено отверстие, ось которого перпендикулярна направлению движущегося потока. Давление во внутренней камере трубки Пито складывается из статического и динамического давлений потока (полный напор); во внешней камере измеряется только статическое давление. Перепад давления, измеренный в двух камерах, фактически обусловлен динамическим давлением потока и связан со скоростью потока.

Математически полное давление P_t является суммой динамического давления P_d и статического давления P_s :

$$P_t = P_s + P_d. \quad (10.16)$$

Динамическое давление эквивалентно кинетической энергии движущегося потока. Согласно законам механики кинетическая энергия $KЭ$ потока может быть выраже-

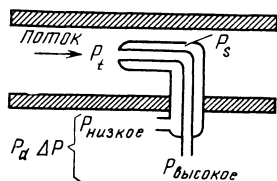


Рис. 10.41. Трубка Пито

на следующим уравнением:

$$K\mathcal{E} = 1/2(mv^2), \quad (10.17)$$

где m — масса; v — скорость потока.

Масса и вес связаны следующим образом:

$$m = W/g, \quad (10.18)$$

где W — вес; g — ускорение силы тяжести.

Выполнив несложные преобразования, получим

$$K\mathcal{E} = Wv^2/2g. \quad (10.19)$$

Переписав уравнение (10.19) для единицы объема, получим

$$K\mathcal{E} = \gamma v^2/2g, \quad (10.20)$$

где γ — удельный вес жидкости.

Кинетическая энергия потока эквивалентна динамическому давлению. Следовательно, уравнение (10.16) можно записать следующим образом:

$$P_t = P_s + (\gamma v^2)/2g. \quad (10.21)$$

Решение этого уравнения относительно v дает

$$v = [(2g/\gamma)(P_t - P_s)]^{1/2}. \quad (10.22)$$

Расход определяют, пользуясь уравнением (10.22) и уравнением неразрывности потока.

Обычно трубки Пито делают небольшого диаметра, чтобы максимально исключить влияние неоднородности измеряемой среды. Трубками Пито измеряется скорость в какой-либо точке сечения потока, а скорость потока изменяется по сечению, поэтому определяют среднюю скорость потока, которая обычно составляет около 0,83 максимальной скорости (Beckwith and Buck, 1961). Трубку Пито устанавливают по оси трубопровода и измеряют скорость потока в центре сечения. Умножив эту величину на 0,83 (коэффициент коррекции), получают среднюю скорость потока, которую и подставляют в уравнение неразрывности. Решение системы уравнений дает величину расхода.

Трубки Пито должны устанавливаться навстречу движущемуся потоку, чтобы они реагировали на динамический напор. Угол между осью движущегося потока и осью трубки Пито (угол отклонения) должен быть равен нулю, в противном случае возникают значительные ошибки.

Выше были рассмотрены устройства для измерения расхода по переменному перепаду давления применительно к таким несжимаемым жидкостям, как, например, пресная или соленая вода. Все они могут также применяться и для измерения сжимаемых сред, например воздуха, но в этом случае в рабочую формулу расхода вводится поправочный коэффициент, учитывающий влияние сжимаемости при прохождении воздуха через сужающее устрой-

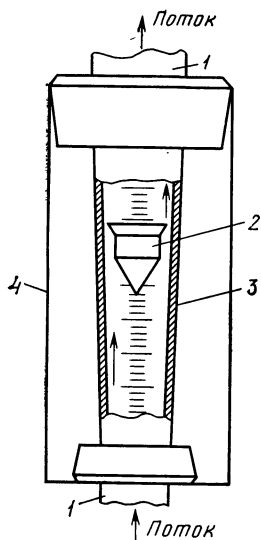


Рис. 10.42. Ротаметр:

1 — патрубок; 2 — поплавок; 3 — стекло или пластмасса; 4 — корпус

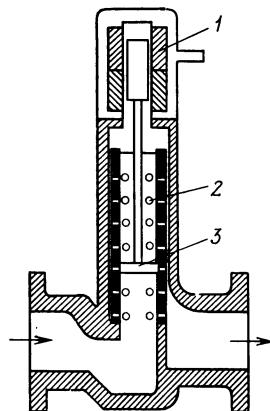


Рис. 10.43. Расходомер с погруженным поршнем (Еckman, 1950):

1 — датчик положения поршня; 2 — отверстие для прохода воды; 3 — поршень

во. Рассмотрение сжимаемых жидкостей не входило в задачу автора, поэтому читатели, интересующиеся этим вопросом, могут обратиться к работе, изданной Американским обществом инженеров-механиков «Расходомеры. Теория и применение» (1959).

Расходомеры постоянного перепада давления. Согласно уравнению (10.13) перепад давления, замеренный у сужающего устройства, пропорционален квадрату расхода через отверстие этого сужающего устройства. Этот метод достаточно удобен, но требует широкого ряда дифманометров для измерения давлений различного порядка в зависимости от измеряемого расхода, которые не всегда способны обеспечить достаточную точность, особенно в случае измерения малых расходов.

Ротационный расходомер. К числу устройств, работающих по принципу измерения расхода при постоянном перепаде давлений, относится ротационный расходомер. В этом случае переменным является поперечное сечение потока, а перепад давления остается постоянным при всех значениях расхода. По способу передачи показаний ротаметр, изображенный на рис. 10.42, относится к ротаметрам с непосредственным отсчетом показаний по линейной шкале. Прибор состоит из вертикальной, конически расширяющейся прозрачной трубки и свободно перемещающегося в ней «поплавка». Поскольку плотность материала «поплавка» больше плотности жидкости, название «поплавок» условно. Трубка прибора должна быть установлена строго вертикально. Поток измеряемого вещества поступает через узкий входной участок труб-

ки и проходит снизу вверх. На поплавков действуют две силы: сила его тяжести и подъемная сила, обусловленная действием потока. Поплавок поднимается до тех пор, пока эти силы не уравновесятся. Начиная с этого момента, поплавок зависает на определенной высоте. На поверхность трубки наносится шкала, позволяющая определить точное положение поплавка относительно начала шкалы. Поскольку высота подъема поплавка является мерой расхода, шкала может быть отградуирована непосредственно в литрах в минуту или в других единицах расхода, однако чаще применяется метод градуировки шкалы в безразмерных единицах от 0 до 100, которые переводятся в значения действительного расхода с помощью градуировочных кривых.

Математически расход жидкости, прошедшей через ротаметр, может быть выражен следующим образом (Schoenborn and Colburn, 1939):

$$Q = A_1 C [2gV_2 (\rho_2 - \rho_1) / A_2 \rho_1]^{1/2}, \quad (10.23)$$

где Q — объемный расход, см/с; A — площадь поперечного сечения, см; C — коэффициент расхода; V — объем, см; g — ускорение силы тяжести, см/с; ρ — плотность, г/см³.

Индекс 1 относится к жидкости, индекс 2 — к поплавку.

Значение коэффициента расхода C следует определять опытным путем для конкретной жидкости или газа, с которой будет работать ротаметр. Градуировка ротаметров может производиться на испытательной расходомерной установке с измерением расхода методом прямых измерений либо с помощью другого отградуированного расходомера, как описано выше для сопла Вентури. Построенная градуировочная кривая представляет собой зависимость значений высоты положения поплавка, наблюдаемой по шкале ротаметра, от значений расхода в требуемых пределах измерений. Обычно для ротаметров эта зависимость выражается прямой линией. Далее определяют положение поплавка по шкале прибора и, пользуясь градуировочными кривыми, устанавливают соответствующее значение расхода.

Необходимым условием получения надежных измерений является строго вертикальная установка ротаметра. Ротаметры нельзя применять для измерения расхода жидкостей с высоким содержанием механических примесей, особенно крупных размеров, а также для непрозрачных жидкостей. Приборы для измерения расхода жидкостей с высокой температурой и давлением стоят очень дорого. Однако у ротаметров имеется много преимуществ по сравнению с другими расходомерами. К ним относятся: удобство линейной шкалы, охватывающей весь диапазон измерений прибора, и постоянство перепада давления при всех значениях расхода. Пределы измерений прибора легко изменить, для этого достаточно взять другую трубку или поплавок. Ротаметры, в частности, удобны для измерения расхода коррозионно-активных жидкостей, например соленой воды, так как поверхности, находящиеся в контакте с измеряемым веществом, могут быть выполнены из любого ма-

териала, например стекла, пластмассы и т. п. Поплавок делается либо полностью из металла, либо покрывается сверху пластмассовой оболочкой. Применение коррозионно-стойких материалов увеличивает стоимость прибора. Во время работы можно следить за потоком.

Расходомер с погруженным поршнем. К расходомерам постоянного перепада давлений относятся расходомеры с погруженным поршнем. При работе прибора (рис. 10.43) жидкость поступает под поршень и толкает его вверх. В стенках цилиндра, внутри которого перемещается поршень, имеются сквозные прорезы, щели или другие отверстия. Суммарная площадь отверстий, открываемых поршнем по мере его перемещения вверх под действием нарастающего в системе давления, зависит от расхода: чем больше расход, тем больше суммарная площадь выходных отверстий и тем выше поднимается поршень. В комплекте с этим прибором предусмотрены механические или электрические устройства для регистрации высоты подъема поршня. Градуировка расходомеров с погруженным поршнем производится, как правило, по месту.

Специальные расходомеры. Проволочный термоанемометр. Прибор представляет собой отрезок проволоки, выполненной из электропроводного материала и соединенной с источником электрической энергии; при прохождении по ней электрического тока проволока нагревается. Существует две модификации этого прибора: термоанемометры постоянного по величине тока и термоанемометры постоянной температуры. В первом случае сила тока является постоянной величиной. При измерении скорости потока измеряемого вещества температура проволоки изменяется, а вместе с ней и ее электрическое сопротивление. Таким образом, электрическое сопротивление проволоки пропорционально скорости потока. В анемометрах постоянной температуры температура проволоки поддерживается постоянной в результате изменения величины тока, которая в данном случае является переменной величиной и служит критерием изменения скорости потока (расхода).

Метод измерения расхода проволочными термоанемометрами является достаточно удобным и обеспечивает высокую точность измерений. Однако область его применения ограничена из-за чрезвычайной непрочности нагретой проволоки. Проволочные термоанемометры предназначены преимущественно для измерения расхода газов и только в исключительных случаях применяются для измерения расхода жидкостей.

Турбинные расходомеры. В комплект прибора входит турбинка или пропеллер и счетное устройство, преобразующее частоту вращения турбинки в импульсы (рис. 10.44). Частота вращения турбинки пропорциональна скорости измеряемого потока, так как лопатки установлены на ее корпусе под определенным углом к оси вращения, а ось вращения турбинки совпадает с направлением потока. На рис. 10.45 показан промышленный образец с трубчатыми струевыпрямителями и электромагнитными устройствами, воспринимающими вращение турбинки. Это устройство пригодно

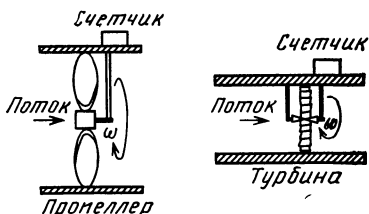


Рис. 10.44. Схема, поясняющая принцип действия турбинного расходомера

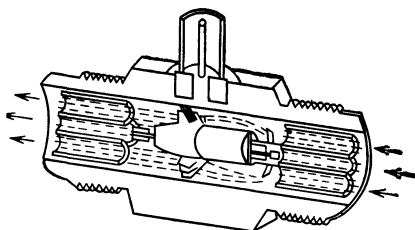


Рис. 10.45. Промышленный образец турбинного расходомера

для измерения расходов в трубопроводах большого диаметра, в открытых каналах, реках, а также для измерения скорости течений в океанах и озерах. Существует много разновидностей турбинных расходомеров: от приборов чашечного типа, применяемых метеорологами для определения скорости ветра, до образца, показанного на рис. 10.45. При измерениях потоков в открытых каналах, реках, озерах и океанах применяется модификация этого образца, которая снабжена пластиной, жестко прикрепленной к наружной поверхности расходомера параллельно оси вращения турбинки. Цель этого простого приспособления состоит в том, чтобы удерживать расходомер в определенном положении, когда ось вращения турбинки параллельна потоку. Под действием течения пластина все время поворачивается, стремясь занять положение, в котором ее сопротивление потоку будет наименьшим.

Турбинные расходомеры нашли широкое применение при измерениях в нестационарных условиях, так как, обеспечивая достаточную точность измерений, они отличаются механической прочностью, удобны в эксплуатации и не требуют сложных регистрирующих приборов. К достоинствам этого прибора относится также невысокая стоимость. Погрешность измерений промышленных приборов не превышает 0,5% верхнего предела измерений.

Электромагнитные расходомеры Принцип электромагнитных расходомеров (рис. 10.46) заключается в том, что движущаяся среда, которая должна обладать хотя бы минимальной электропроводностью, рассматривается как проводник, перемещающийся в магнитном поле. Трубопровод устанавливается в магнитном поле таким образом, чтобы направление потока было перпендикулярно линиям магнитного поля. ЭДС, индуцируемая в жидкости, направлена перпендикулярно линиям магнитного поля и потоку жидкости. ЭДС снимается двумя электродами, которые направляют полученный сигнал к прибору, измеряющему разность потенциалов.

Согласно закону Фарадея величина индуцируемой ЭДС

$$E = BLv \cdot 10^{-12},$$

где E — индуцируемая ЭДС, В; B — индукция магнитного поля, В·с/см²; L — длина проводника, см; v — скорость перемещения проводника, см/с.

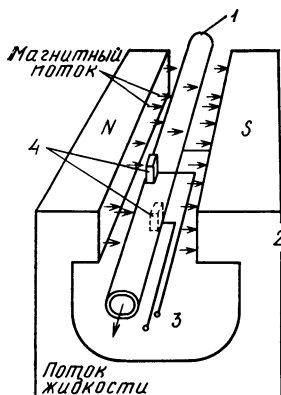


Рис. 10.46. Основные элементы электромагнитного расходомера:

1 — трубопровод; 2 — магнит; 3 — выводы электродов; 4 — электроды

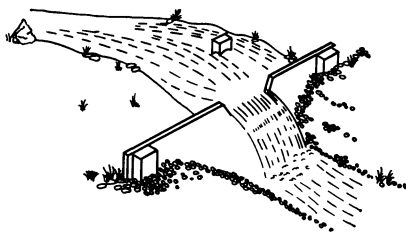


Рис. 10.47. Водослив

Поскольку сама среда рассматривается как движущийся проводник, ЭДС, индуцируемая в жидкости, пропорциональна скорости потока.

Существует две основные модификации электромагнитного расходомера. В одной из них жидкость, обладающая низкой электропроводностью, пропускается по трубопроводу, изготовленному из стекла, пластмассы или другого неэлектропроводного материала. Электроды вмонтированы в стенки трубопровода и находятся в непосредственном контакте с жидкостью. Приборы этого типа выдают слабый по величине сигнал, который требует усиления. Второй вариант в отличие от первого предусматривает размещение электродов на наружной стенке трубопровода, который изготавливается из электропроводного материала. Жидкость в этом случае также должна обладать высокой электропроводностью (например, жидкий металл)—условие, необходимое для работы расходомеров этого типа. В этой системе непосредственный контакт между жидкостью и электродами отсутствует. Применение прибора не требует переоборудования существующего трубопровода и не вызывает никаких технических сложностей при установке. Обычно выходной сигнал такого расходомера тем больше, чем выше электропроводность измеряемой жидкости, и может передаваться непосредственно на записывающее устройство без предварительного усиления.

Основным недостатком электромагнитных расходомеров всех типов является высокая стоимость. Однако этот недостаток компенсируется надежностью прибора, в котором нет движущихся частей. Точность измерений, обеспечиваемая расходомерами этого типа, достаточно высокая.

Ультразвуковые расходомеры. В этих расходомерах используются ультразвуковые колебания частотой 100 Гц (Beckwith and Buck, 1961). На трубопроводе монтируются пьезоэлектрические или магнитострикционные элементы с интервалом в несколько сантиметров, служащие один в качестве излучателя ультразву-

ка, другой — в качестве приемника. Ультразвуковые волны проходят через жидкость с различной скоростью в зависимости от того, совпадают ли направления распространения звука и течения жидкости или они противоположны. Регистрируемая датчиком разность фаз колебаний, поступающих с приемников, пропорциональна скорости жидкости. Чувствительность схемы может быть увеличена методом автоматической замены функций пары пьезоэлементов на противоположные. Быстрое периодическое изменение функций пары излучателя и приемника (до 10 раз в секунду) обеспечивает возможность измерения сдвига фаз ультразвуковых колебаний, направляемых одновременно по потоку и против него. Выходной импульс разности частот ультразвуковых колебаний удваивается по сравнению с основной схемой для одной и той же скорости потока.

Измерение расхода в открытых каналах. Для измерения расхода в открытых каналах используются водосливы различных типов и конструкций, водомерные желоба и турбинные счетчики. Принцип действия и конструкция турбинных счетчиков были описаны выше. На практике при измерениях расхода жидкости значения скорости отбирают в различных точках поперечного сечения потока, как по горизонтали, так и по вертикали, и получают эпюру скоростей по сечению потока. Такой метод измерения обеспечивает необходимую точность. Обычно скорости в разных точках сечения не равны между собой, поэтому действительное значение расхода определяют одним из двух способов: либо интегрированием, либо подсчитывают среднюю скорость потока и полученное значение умножают на площадь поперечного сечения потока.

Водосливы. Преграда, поставленная на пути движения потока, через которую происходит перелив воды, называется водосливом. Она может иметь вырез различной формы. На рис. 10.47 показан один из водосливов. Поскольку водосливы применяются исключительно в открытых каналах, их можно использовать только для измерения расхода жидкостей. Большинство водосливов в инженерной практике служат для замера расходов воды, и лишь некоторые из них, как правило, в лабораторных условиях, применяются для измерения расходов других жидкостей.

Типы и конструкции водосливов весьма разнообразны. Водосливы с острой кромкой (т. е. водосливы, по периметру выреза которых укреплен металлический лист с острой кромкой) по форме выреза отверстия в стенке делятся на водосливы прямоугольного, треугольного (V-образного), круглого и специального сечений. К специальным относятся водосливы трапециевидного и параболического сечений. Эти профили обеспечивают постоянство расхода или прямо пропорциональную зависимость расхода от напора.

На рис. 10.48 приведены основные размеры водослива. Порог (или гребень) водослива — это нижняя сторона выреза водослива. Длина порога L измеряется как расстояние между боковыми стенками прорези (см. рис. 10.48). Для прямоугольного сечения дли-

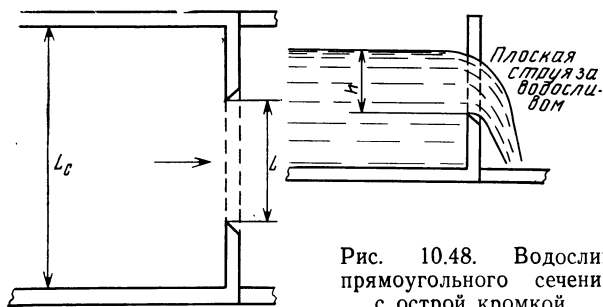


Рис. 10.48. Водослив прямоугольного сечения с острой кромкой

на порога равна ширине выреза водослива. В водосливе треугольного сечения длина порога приближается к нулю. Статический напор на водосливе h — расстояние от гребня водослива до наивысшего уровня свободной поверхности воды, замеряемое выше водослива (см. рис. 10.48), так как снижение свободной поверхности начинается еще до водослива.

Поток воды, пропущенный через водослив, называют плоской струей за водосливом. При достаточных расходе и перепаде между гребнем водослива и горизонтом в нижнем бьефе пространство под струей сообщается с атмосферой. Такую струю называют свободной или незатопленной. Величина напора для свободной струи определяется рядом факторов, среди которых острота кромки водослива, толщина гребня и др. Установлено, что эта величина должна находиться в пределах от 1 до 3 см (ASME, 1959). Если расстояние между гребнем порога и горизонтом в нижнем бьефе водослива недостаточно, пространство под струей изолировано от атмосферы, и струя прилипает к стенке водослива. Такую струю называют прилипшей или затопленной.

Если длина водослива меньше ширины канала L_c (см. рис. 10.48), такой водослив называется водосливом с боковым сжатием, а поток, пропущенный через этот водослив, — сжатым потоком. В сжатом потоке направление движения частиц жидкости крайних линий тока, притекающих к вырезу водослива от боковых стенок канала, измеряется. В связи с этим при истечении жидкости через водослив происходит боковая деформация плоской струи сразу за водосливом, или «сжатие потока». Поскольку сжатие потока отражается на величине расхода, оно учитывается при расчетах соответствующей поправкой. Можно добиться того, чтобы протекающие крайние линии тока не создавали сжатия поперечного сечения потока. Это возможно при условии, если разность между шириной канала L_c и длиной порога L_w , по крайней мере, в 4 раза больше максимального значения ожидаемого напора. Математически это условие может быть выражено следующей формулой:

$$L_c - L_w > 4h_{\text{макс}}. \quad (10.24)$$

Формулу теоретического расхода для водослива прямоугольного сечения можно получить, найдя элементарный расход жидкости

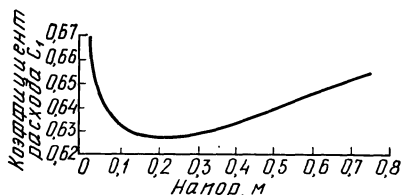


Рис. 10.49. Значения коэффициента расхода, полученные для водосливов прямоугольного сечения с двусторонним боковым сжатием (Fluid Meters, 1959)

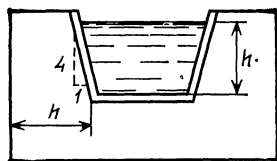


Рис. 10.50. Водослив трапециевидного сечения Чиполетти

через элементарную площадку водослива и суммируя его по площади поперечного сечения потока:

$$Q_T = 2L_w \sqrt{2gh^3} / 3, \quad (10.25)$$

где Q_T — теоретическое значение расхода, м/с; L_w — длина порога, м; g — ускорение силы тяжести ($9,8 \text{ м/с}^2$); h — напор на водосливе, м.

Деформация поперечного сечения потока в вертикальной плоскости и некоторые другие факторы учитываются безразмерным коэффициентом C , который вводится в формулу для определения теоретического значения расхода и представляет собой отношение

$$C_1 = Q_d / Q_T, \quad (10.26)$$

где Q_d и Q_T — действительное и теоретическое значения расхода.

Таким образом, рабочая формула расхода для водослива прямоугольного сечения принимает вид

$$Q_d = 2C_1 L_w \sqrt{2gh^3} / 3. \quad (10.27)$$

Поскольку действительное значение расхода всегда меньше теоретического, коэффициент расхода C всегда меньше 1, обычно его величина меньше 0,7 (ASME, 1959). Значения коэффициентов расхода для водосливов прямоугольного сечения с открытыми кромками приведены на рис. 10.49. Эти коэффициенты могут быть приняты для расчета с учетом погрешности измерений в пределах $\pm 3\%$.

Данный метод измерения применительно к водосливу прямоугольного сечения имеет два ограничения. Первое: при слишком больших значениях расхода на величине напора начинает существенно отражаться увеличение скорости потока, поэтому в значение напора, измеренное на водосливе, должна быть внесена поправка на величину динамического напора $v^2/2g$ (v — скорость течения в канале), которую прибавляют к напору на водосливе. Второе: длина порога водослива прямоугольного сечения должна составлять не менее 15 см (ASME, 1959). При меньших значениях длины порога наблюдается перемешивание притекающих боковых линий тока друг с другом. При слишком малых расходах, затрудняющих

свободный перелив жидкости в водосливах прямоугольного сечения с длиной порога 15 см, предпочтительнее применять водосливы треугольного сечения, которые в таких случаях обеспечивают лучшие результаты.

Применяемая для практических расчетов формула расхода получается из уравнения (10.27) с учетом коэффициента C , в который вошли константы ($2/3$ и $\sqrt{2g}$):

$$Q_d = CL_w(h)^{3/2}, \quad (10.28)$$

В системе единиц СИ уравнение (10.28) приобретает вид

$$Q_d = 1,84L_w(h)^{3/2}. \quad (10.29)$$

где Q — расход, $\text{м}^3/\text{с}$; L_w — длина порога, м ; h — напор, м .

Уравнение (10.29) представляет собой основную формулу расхода для водослива прямоугольного сечения, полученную без учета бокового сжатия сечения струи (т. е. при условии, что длина порога равна ширине канала). В инженерной практике для коррекции этого фактора принимается допущение о том, что эффективная длина порога водослива меньше действительной на $0,1h$ с каждой стороны. Таким образом, для водослива с двусторонним боковым сжатием эффективная длина порога L_w на $0,2h$ меньше действительной. Последнее условие вводится в формулу расхода (10.29), которая теперь в окончательном виде будет выглядеть следующим образом:

$$Q = 1,84(L_w - 0,2h)(h)^{3/2}. \quad (10.30)$$

В табл. 10.1 приведены значения расхода в зависимости от напора для водосливов прямоугольного сечения с различной эффективной длиной порога.

Трапециевидные водосливы. Предложенная Чиполетти трапециевидная форма сечения с уклоном боковых сторон 1:4 обеспечивает для водосливов с двусторонним боковым сжатием прямо пропорциональную зависимость между длиной порога и расходом (рис. 10.50). Соотношение сторон подобрано таким образом, что небольшое расширение выреза водослива по мере увеличения высоты его заполнения компенсирует потери расхода, обусловленные боковым сжатием струи. Таким образом, из формулы расхода можно исключить поправку на боковое сжатие струи. Это является основным преимуществом трапециевидного водослива Чиполетти, которое обуславливает его широкое применение. Расход для водослива Чиполетти рассчитывают по следующей формуле:

$$Q = 1,37L_w(h)^{3/2}. \quad (10.31)$$

В табл. 10.2 приведены значения расхода в зависимости от величины напора и длины порога для водослива Чиполетти.

Водослив треугольного сечения с прямым углом при вершине. При невысоком уровне воды в канале рекомендуется применять водосливы треугольного сечения, так как в этом случае водосливы прямоугольного или трапециевидного се-

Таблица 10.1. Значения расхода для водосливов прямоугольного сечения с двусторонним боковым сжатием (в л/с)

Напор, см	Ширина водослива, см											
	5,0	10,0	15,0	20,0	25,0	30,0	60,0	90,0	120,0	180,0	240,0	300,0
2	0,24	0,50	0,76	1,02	1,28	1,54	3,10	4,66	6,22	9,35	12,47	15,59
4	0,62	1,35	2,09	2,83	3,56	4,30	8,71	13,13	17,55	26,38	35,21	44,04
6	1,03	2,38	3,73	5,08	6,44	7,79	15,90	24,01	32,13	48,35	64,58	80,80
8	1,42	3,50	5,58	7,66	9,74	11,82	24,31	36,80	49,30	74,28	99,26	124,24
10	1,75	4,65	7,56	10,47	13,38	16,29	33,75	51,20	68,66	103,57	138,48	173,39
12	1,99	5,81	9,64	13,46	17,29	21,11	44,06	67,00	89,95	135,84	181,73	227,63
14	2,12	6,94	11,76	16,58	21,40	26,22	55,13	84,05	112,96	170,79	228,63	286,46
16	2,12	8,01	13,90	19,78	25,67	31,56	66,89	102,22	137,54	208,20	278,86	349,51
18	1,97	8,99	16,02	23,04	30,07	37,10	79,25	121,41	163,56	247,87	332,18	416,49
20	1,65	9,87	18,10	26,33	34,56	42,79	92,16	141,53	190,91	289,65	388,40	487,14
22	1,14	10,63	20,13	29,62	39,11	48,61	105,57	162,53	219,49	333,41	447,33	561,25
24	0,43	11,25	22,07	32,68	43,70	54,52	119,42	184,32	249,22	379,03	508,83	638,63
26	11,71	23,91	36,10	48,30	60,50	72,56	133,68	206,86	280,04	426,40	572,76	719,13
28	12,00	25,63	39,26	52,89	66,52	80,10	148,30	230,09	311,88	475,45	639,02	802,59
30	12,09	27,21	42,33	57,45	72,56	87,61	163,27	253,97	344,67	526,08	707,48	888,89
32	11,99	28,64	45,30	61,95	78,61	95,30	178,53	278,45	378,37	578,22	778,06	977,91
34	11,67	29,91	48,15	66,39	84,63	103,50	194,07	303,50	412,94	631,81	850,68	1069,55
36	11,13	31,00	50,87	70,74	90,62	110,48	209,85	329,08	448,31	686,78	925,24	1163,70
38	10,34	31,90	53,45	75,00	96,55	118,08	225,85	355,16	484,46	743,07	1001,68	1260,29
40	9,31	32,58	55,86	79,13	102,41	124,18	242,85	381,70	521,35	800,64	1079,93	1359,22
42	8,01	33,05	58,10	83,14	108,18	128,43	258,43	408,68	558,93	859,43	1159,93	1460,42
44	6,44	33,30	60,15	87,00	113,85	131,96	274,96	436,07	597,17	919,39	1241,61	1563,83
46	4,59	33,30	62,00	90,70	119,40	138,48	291,62	463,84	636,05	980,49	1324,92	1669,36
48	2,45	33,04	63,64	94,23	124,83	142,83	308,40	491,97	675,54	1042,68	1409,81	1776,95
50		32,53	65,05	97,58	130,11	150,11	325,27	520,43	715,59	1105,91	1496,24	1886,56

Напор, см	Ширина водослива, см											
	5,0	10,0	15,0	20,0	25,0	30,0	60,0	90,0	120,0	180,0	240,0	300,0
52			31,74	66,24	100,73	135,23	342,22	549,21	756,19	1170,17	1584,14	1998,12
54			30,67	67,17	103,68	140,19	349,23	578,27	797,32	1235,40	1673,49	2111,58
56			29,30	67,86	106,41	144,96	376,29	607,61	838,94	1301,58	1764,23	2226,88
58			27,63	68,27	108,91	149,55	393,37	637,20	881,03	1368,68	1856,33	2343,99
60			25,65	68,41	111,17	153,93	410,47	667,02	923,57	1436,66	1949,75	2462,85
62			23,35	68,27	113,18	158,09	427,57	697,06	966,54	1505,50	2044,46	2583,42
64			20,73	67,83	114,93	162,04	444,66	727,29	1009,91	1575,16	2140,41	2705,65
66			17,76	67,09	116,42	165,75	461,72	757,70	1053,67	1645,62	2237,57	2829,52
68			14,44	66,03	117,62	169,21	478,64	788,27	1097,80	1716,26	2335,92	2954,98
70			10,78	64,66	118,54	172,42	495,70	818,99	1142,28	1788,85	2435,42	3081,99
72			6,74	62,95	119,16	175,36	512,60	849,84	1187,08	1861,56	2536,04	3210,52
74			2,34	60,91	119,47	178,04	529,42	880,81	1232,20	1934,98	2637,75	3340,53
76				58,52	119,47	180,43	546,16	911,88	1277,61	2009,07	2740,53	3471,99
78				55,77	119,15	182,52	562,79	943,05	1323,31	2083,83	2844,35	3604,87
80				52,66	118,49	184,32	579,30	974,68	1369,26	2159,22	2949,18	3739,13
82				49,19	117,50	185,81	595,70	1006,58	1415,46	2235,23	3054,99	3874,76
84				45,33	116,16	186,99	611,96	1036,93	1461,90	2311,84	3161,77	4011,71
86				41,09	114,46	187,83	628,07	1068,31	1508,55	2389,02	3269,49	4149,97
88				36,45	112,40	188,35	644,03	1099,72	1555,40	2466,77	3378,13	4289,50
90				31,42	109,97	188,52	659,83	1131,13	1602,44	2545,05	3487,66	4430,27
92				25,98	107,16	188,35	675,45	1162,55	1649,66	2623,86	3598,07	4572,27
94				20,12	103,97	187,81	690,89	1193,96	1697,03	2703,18	3709,32	4715,47
96				13,85	100,38	186,92	706,13	1225,34	1744,56	2782,98	3821,41	4859,84
98				7,14	96,39	185,65	721,17	1256,69	1792,22	2863,26	3934,31	5005,36
100					92,00	184,00	736,00	1288,00	1840,00	2944,00	4048,00	5152,00

Таблица 10.2. Значения расхода для водослива трапцевидного сечения Чиполетти с двусторонним боковым сжатием (в л/с)

Напор, см	Ширина водослива, см											
	5,0	10,0	15,0	20,0	25,0	30,0	60,0	90,0	120,0	180,0	240,0	300,0
2	0,19	0,39	0,58	0,77	0,97	1,16	2,32	3,49	4,65	6,97	9,30	11,62
4	0,55	1,10	1,64	2,19	2,74	3,29	6,58	9,86	13,15	19,73	26,30	32,88
6	1,01	2,01	3,02	4,03	5,03	6,04	12,08	18,12	24,16	36,24	48,32	60,40
8	1,55	3,10	4,65	6,20	7,75	9,30	18,60	27,90	37,20	55,80	74,40	93,00
10	2,17	4,33	6,50	8,66	10,83	13,00	25,99	38,99	51,99	77,98	103,98	129,97
12	2,85	5,69	8,54	11,39	14,24	17,08	34,17	51,25	68,34	102,51	136,68	170,85
14	3,59	7,18	10,76	14,35	17,94	21,53	43,06	64,59	86,12	129,18	172,24	215,29
16	4,38	8,77	13,15	17,54	21,92	26,30	52,61	78,91	105,22	157,82	210,43	263,04
18	5,23	10,46	15,69	20,92	26,16	31,39	62,77	94,16	125,55	188,32	251,10	313,87
20	6,13	12,25	18,38	24,51	30,63	36,76	73,52	110,28	147,04	220,57	294,09	367,61
22	7,07	14,14	21,21	28,27	35,34	42,41	84,82	127,23	169,64	254,46	339,29	424,11
24	8,05	16,11	24,16	32,22	40,27	48,32	96,65	144,97	193,29	289,94	386,59	483,24
26	9,08	18,16	27,24	36,33	45,41	54,49	108,98	163,46	217,95	326,93	435,90	544,88
28	10,15	20,30	30,45	40,60	50,75	60,89	121,79	182,68	243,58	365,37	487,16	608,95
30	11,26	22,51	33,77	45,02	56,28	67,53	135,07	202,60	270,14	405,21	540,27	675,34
32	12,40	24,80	37,20	49,60	62,00	74,40	148,80	223,20	297,60	446,39	595,19	743,99
34	13,58	27,16	40,74	54,32	67,90	81,48	162,96	244,45	325,93	488,89	651,85	814,82
36	14,80	29,59	44,39	59,18	73,98	88,78	177,55	266,33	355,10	532,66	710,21	887,76
38	16,05	32,09	48,14	64,18	80,23	96,28	192,55	288,83	385,10	577,65	770,21	962,76
40	17,33	34,66	51,99	69,32	86,65	103,98	207,95	311,93	415,90	623,85	831,81	1039,76
42	18,65	37,29	55,94	74,58	93,23	111,87	223,74	335,61	447,48	671,22	894,96	1118,71
44	19,99	39,99	59,98	79,97	99,96	119,96	239,91	359,87	479,82	719,73	959,65	1199,56
46	21,37	42,74	64,11	85,48	106,86	128,23	256,45	384,68	512,91	769,36	1025,81	1282,27
48	22,78	45,56	68,34	91,12	113,90	136,68	273,36	410,04	546,72	820,08	1093,44	1366,80
50	24,22	48,44	72,66	96,87	121,09	145,31	290,62	435,93	581,24	871,86	1162,48	1453,10

Напор, см	Ширина водослива, см												
	5,0	10,0	15,0	20,0	25,0	30,0	60,0	90,0	120,0	180,0	240,0	300,0	
52	25,69	51,37	77,06	102,74	128,43	154,12	308,23	462,35	616,46	924,69	1232,93	1541,16	
54	27,18	54,36	81,55	108,73	135,91	163,08	326,18	489,28	652,37	978,55	1304,74	1630,92	
56	28,71	57,41	86,12	114,82	143,53	172,24	344,47	516,71	688,94	1033,42	1377,89	1722,36	
58	30,26	60,51	90,77	121,03	151,29	181,52	363,09	544,63	726,18	1089,27	1452,36	1815,45	
60	31,84	63,67	95,51	127,34	159,18	191,05	382,03	573,05	764,06	1146,09	1528,12	1910,16	
62	33,44	66,88	100,32	133,76	167,20	200,65	401,29	601,94	802,58	1203,87	1605,16	2006,45	
64	35,07	70,14	105,22	140,29	175,36	210,43	420,86	631,30	841,73	1262,59	1683,46	2104,32	
66	36,73	73,46	110,19	146,92	183,64	220,37	440,75	661,12	881,49	1322,24	1762,98	2203,73	
68	38,41	76,82	115,23	153,64	192,05	230,47	460,93	691,40	921,86	1382,79	1843,72	2304,65	
70	40,12	80,24	120,35	160,47	200,59	240,71	481,41	722,12	962,83	1444,24	1925,66	2407,07	
72	41,85	83,70	125,55	167,40	209,25	251,10	502,19	753,29	1004,39	1506,58	2008,77	2510,96	
74	43,61	87,21	130,82	174,42	218,03	261,63	523,26	784,89	1046,52	1569,79	2093,05	2616,31	
76	45,38	90,77	136,15	181,54	226,92	272,31	544,62	816,93	1089,24	1633,85	2178,47	2723,09	
78	47,19	94,38	141,56	188,75	235,94	283,13	566,26	849,39	1132,51	1698,77	2265,03	2831,29	
80	49,01	98,03	147,04	196,06	245,07	294,09	588,18	882,26	1176,35	1764,53	2352,70	2940,88	
82	50,86	101,73	152,59	203,46	254,32	305,18	610,37	915,55	1230,74	1831,11	2441,48	3051,85	
84	52,74	105,47	158,21	210,95	263,68	316,42	632,84	949,25	1265,67	1898,51	2531,34	3164,18	
86	54,63	109,26	163,89	218,52	273,15	327,78	655,57	983,36	1311,14	1966,71	2622,28	3277,85	
88	56,55	113,10	169,64	226,19	282,74	339,29	678,57	1017,86	1357,14	2035,72	2714,29	3392,86	
90	58,49	116,97	175,46	233,95	292,43	350,92	701,84	1052,75	1403,67	2105,51	2807,34	3509,18	
92	60,45	120,89	181,34	241,79	302,23	362,68	725,36	1088,04	1450,72	2176,08	2901,44	3626,80	
94	62,43	124,86	187,29	249,71	312,14	374,57	749,14	1123,71	1498,28	2247,42	2996,56	3745,70	
96	64,43	128,86	193,29	257,73	322,16	386,59	773,18	1159,76	1546,35	2319,53	3092,71	3865,88	
98	66,46	132,91	199,37	265,82	332,28	398,73	797,46	1196,20	1594,93	2392,39	3189,85	3987,32	
100	68,50	137,00	205,50	274,00	342,50	411,00	822,00	1233,00	1644,00	2466,00	3288,00	4110,00	

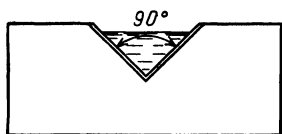


Рис. 10.51. Водослив треугольного сечения с прямым углом при вершине

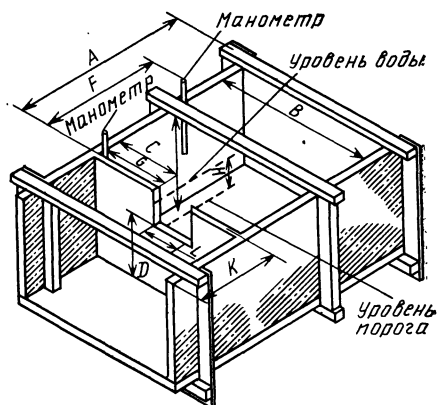


Рис. 10.52. Водосливный короб (размеры приведены в табл. 10.4) (US Department of Agriculture Farmers bulletin 813)

чений не обеспечивают необходимой точности измерений. Кроме того, водосливы треугольного сечения (рис. 10.51) удобны для измерения потоков с переменным расходом, так как длина порога у них практически приближается к нулю и при небольших расходах создаются условия для поддержания свободного истечения жидкости через водослив. Площадь поперечного сечения водослива — величина переменная и является функцией произведения напора на ширину свободной поверхности воды на водосливе. Это обстоятельство позволяет использовать водослив треугольного сечения для измерения потоков с расходом, изменяющимся в широких пределах.

Формула расхода для водослива треугольного сечения с прямым углом при вершине

$$Q = 1,37h^{3/2}. \quad (10.32)$$

Расход в зависимости от напора для водосливов этого профиля приведен в табл. 10.3.

Установка водосливов. Водослив может быть установлен в виде преграды на пути потока в существующем канале или помещен в специальный водосливный короб, представляющий собой короткую секцию канала (рис. 10.52). Размеры водосливных коробов для различных типов и конструкций водосливов, предназначенных для измерения расходов разной величины, приведены в табл. 10.4. Если размеры водосливных коробов точно выдержаны, то они обеспечивают высокую точность измерений при условии правильного технического обслуживания.

Техническое обслуживание водосливов. Точность измерений, обеспечиваемая водосливами в лабораторных условиях, характеризуется погрешностью менее 1 %. На практике при условии правильной установки и грамотного технического обслуживания водосливов погрешность измерений не превышает 5 %. В процессе эксплуатации на стенке водослива со стороны входа потока накапливаются отложения, которые влияют на характер

Таблица 10.3. Значения расхода для водосливов треугольного сечения с прямым углом при вершине (в л/с)

Напор, см	Расход	Напор, см	Расход	Напор, см	Расход	Напор, см	Расход
0,5	0,00	25,5	44,99	50,5	248,28	75,5	678,56
1,0	0,01	26,0	47,22	51,0	254,48	76,0	689,85
1,5	0,04	26,5	49,53	51,5	260,76	76,5	701,25
2,0	0,08	27,0	51,90	52,0	267,13	77,0	712,77
2,5	0,14	27,5	54,33	52,5	273,60	77,5	724,39
3,0	0,21	28,0	56,83	53,0	280,16	78,0	736,13
3,5	0,31	28,5	59,41	53,5	286,82	78,5	747,99
4,0	0,44	29,0	62,05	54,0	293,57	79,0	759,96
4,5	0,59	29,5	64,76	54,5	300,41	79,5	772,04
5,0	0,77	30,0	67,53	55,0	307,35	80,0	784,23
5,5	0,97	30,5	70,38	55,5	314,38	80,5	796,54
6,0	1,21	31,0	73,30	56,0	321,51	81,0	808,97
6,5	1,48	31,5	76,30	56,5	328,73	81,5	821,51
7,0	1,78	32,0	79,36	57,0	336,05	82,0	834,17
7,5	2,11	32,5	82,50	57,5	343,47	82,5	846,95
8,0	2,48	33,0	85,70	58,0	350,99	83,0	859,84
8,5	2,89	33,5	88,99	58,5	358,60	83,5	872,85
9,0	3,33	34,0	92,35	59,0	366,31	84,0	885,97
9,5	3,81	34,5	95,78	59,5	374,12	84,5	899,21
10,0	4,33	35,0	99,29	60,0	382,03	85,0	912,57
10,5	4,89	35,5	102,87	60,5	390,04	85,5	926,05
11,0	5,50	36,0	106,53	61,0	398,15	86,0	939,65
11,5	6,14	36,5	110,27	61,5	406,36	86,5	953,37
12,0	6,83	37,0	114,08	62,0	414,67	87,0	967,21
12,5	7,57	37,5	117,98	62,5	423,08	87,5	981,16
13,0	8,35	38,0	121,95	63,0	431,59	88,0	995,24
13,5	9,17	38,5	126,00	63,5	440,20	88,5	1009,44
14,0	10,05	39,0	130,13	64,0	448,92	89,0	1023,75
14,5	10,97	39,5	134,34	64,5	457,74	89,5	1038,19
15,0	11,94	40,0	138,63	65,0	466,66	90,0	1052,75
15,5	12,96	40,5	143,01	65,5	475,69	90,5	1067,44
16,0	14,03	41,0	147,46	66,0	484,82	91,0	1082,24
16,5	15,15	41,5	152,00	66,5	494,05	91,5	1097,17
17,0	16,32	42,0	156,62	67,0	503,39	92,0	1112,22
17,5	17,55	42,5	161,32	67,5	512,84	92,5	1127,39
18,0	18,83	43,0	166,11	68,0	522,39	93,0	1142,69
18,5	20,17	43,5	170,98	68,5	532,04	93,5	1158,11
19,0	21,56	44,0	175,93	69,0	541,81	94,0	1173,65
19,5	23,00	44,5	180,98	69,5	551,67	94,5	1189,32
20,0	24,51	45,0	186,10	70,0	561,65	95,0	1205,12
20,5	26,07	45,5	191,32	70,5	571,73	95,5	1221,04
21,0	27,69	46,0	196,61	71,0	581,92	96,0	1237,08
21,5	29,36	46,5	202,00	71,5	592,22	96,5	1253,27
22,0	31,10	47,0	207,47	72,0	602,13	97,0	1269,55
22,5	32,90	47,5	213,04	72,5	613,15	97,5	1285,92
23,0	34,76	48,0	218,69	73,0	623,77	98,0	1302,55
23,5	36,68	48,5	224,43	73,5	634,51	98,5	1319,20
24,0	38,66	49,0	230,26	74,0	645,36	99,0	1336,01
24,5	40,70	49,5	236,17	74,5	656,31	99,5	1352,94
25,0	42,81	50,0	242,18	75,0	667,38	100,0	1370,00

Т а б л и ц а 10.4. Размеры водосливных коробов для водосливов прямоугольного сечения, водосливов Чиполлетти, водосливов треугольного сечения с прямым углом при вершине (все размеры даны в метрах); буквенные обозначения те же, что и на рис. 10.52 (USDA Farmers Bulletin 813)

Расход, м ³ /ч	Максимальный напор H	Длина порога водослива L	Расстояние до водослива A	Расстояние от водослива до передней кромки K	Ширина короба B	Высота короба E	От края водослива до боковой стенки C	Высота порога над дном D	Расстояние от водослива до манометра F	Расстояние от боковой кромки водослива до манометра G

Прямоугольный или трапециевидный водослив

50—300	0,30	0,30	1,83	0,61	1,68	1,07	0,69	0,61	1,22	0,61
200—500	0,34	0,46	2,13	0,91	2,13	1,22	0,84	0,76	1,37	0,61
400—800	0,36	0,61	2,44	1,22	2,59	1,37	0,99	0,84	1,52	0,76
600—1400	0,40	0,91	2,74	1,52	3,66	1,52	1,37	0,99	1,68	0,91
1000—2200	0,46	1,22	3,05	1,83	4,27	1,68	1,52	1,07	1,83	0,91

Треугольный вырез водослива с прямым углом при вершине

50—250	0,30	..	1,83	0,61	1,52	0,91	0,76	0,46	1,22	0,61
200—450	0,38	..	1,98	2,59	1,98	0,99	0,99	0,46	1,52	0,76

истечения потока; эти отложения необходимо периодически удалять. Все приведенные выше формулы расхода водосливов выведены с допущением, что напор на водосливе равен одной трети глубины потока на подходе к водосливу. Чрезмерное вымывание русла канала за водосливом приводит к нарушению правильной установки водослива. Для предотвращения этого рекомендуется применять материалы, не подверженные разрушительному действию воды.

Преимущества и недостатки водосливов. К основным преимуществам водосливов относятся: высокая точность измерений; простота конструкции и минимум технического обслуживания; механические примеси небольших размеров могут беспрепятственно проходить через водослив, не оказывая влияния на величину расхода; продолжительный срок эксплуатации.

Водосливам присущи следующие основные недостатки: существенные потери напора в системе; возможность забивания крупными включениями, что отражается на расходных характеристиках и требует очистки, которая обычно производится вручную; снижение точности измерений при изменении формы русла канала до водослива или при значительном накоплении наносных отложений.

Измерение глубины потока. Для определения расходов с помощью водосливов и водомерных лотков необходимо определять глубину потока. Ее измеряют на расстоянии, по крайней мере, $4h$ от передней стенки водослива, т. е. до начала снижения уровня поверхности. Обычно для измерения глубины пользуются крючковым глубиномером, так как этот прибор отличается высокой точностью. Крюк глубиномера (предпочтительно с тупым конусом), соединенный с подвижной шкалой, поднимают из воды до тех пор, пока конец его не покажется на поверхности воды. Подвижная шкала, перемещающаяся вдоль неподвижного указателя глубины, показывает глубину в точке замера. При больших глубинах следует пользоваться модификацией этого прибора, отличающейся тем, что указатель глубины в свою очередь снабжен верньером, который позволяет повысить точность измерений.

Существует несколько других разновидностей глубиномеров, как с непосредственным считыванием показаний, так и работающих совместно с записывающими устройствами. В измерительный комплект входят датчик уровня — обычный поплавок либо устройство, чувствительное к изменению давления, шкала показаний или самописец и часовой механизм (для прибора записывающего типа). Датчики уровня были подробно описаны выше.

Поскольку в каналах с водосливами или лотках жидкость находится в непрерывном движении, при замерах глубины часто целесообразно пользоваться специальными камерами, в которых жидкость будет находиться в состоянии покоя. Успокаивающая камера представляет собой отрезок трубы или короб, соединенный отверстием с движущимся потоком. Внутри успокаивающей камеры вода поднимается до уровня, соответствующего глубине пото-

ка. Небольшая площадь поверхности, заключенная внутри успокаивающей камеры, оказывается неподвижной, что позволяет измерить глубину с высокой точностью. Данный метод измерения дает хорошие результаты, если площадь поверхности внутри успокаивающей камеры примерно в 100 раз больше площади отверстия, соединяющего эту камеру с движущимся потоком (Israelsen and Hansen, 1962).

Эксплуатация водосливов. Ширина русла и глубина канала перед водосливом или в водосливном коробе должны быть достаточными для того, чтобы скорость потока на подходе к водосливу не превышала 15 см/с. Водосливный короб устанавливается таким образом, чтобы его осевая линия была параллельна направлению движения потока. Водослив устанавливают строго по вертикали острой кромкой навстречу переливающемуся потоку. Расстояние между нижней гранью выреза водослива и дном канала должно быть в пределах $2-3h$, причем для водосливов с двусторонним боковым сжатием расстояние от боковой грани выреза водослива до боковой стенки канала должно быть равно, по крайней мере, $2h$. Для получения хороших результатов необходимо, чтобы глубина воды над гребнем водослива была не менее 5 см. В водосливах прямоугольного и трапециевидного сечений величина h не должна превышать одной трети длины порога. В зависимости от типа ниспадающей струи пользуются различными методами определения расхода. Струя воды за водосливом будет иметь вид свободной струи при любых условиях потока, за исключением того случая, когда водослив рассчитывается специально для получения затопшей струи. Шкала глубиномера должна быть отрегулирована таким образом, чтобы ее нулевая отметка совпадала с уровнем порога. Это можно сделать с помощью плотницкого уровня или нивелира. При эксплуатации водосливов необходимо следить за состоянием русла канала после водослива и поддерживать его первоначальную форму.

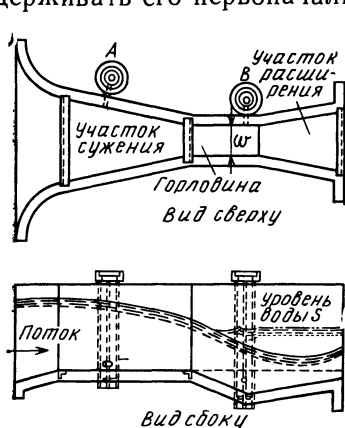


Рис. 10.53. Водомерный лоток Паршелла (Christiansen, 1935)

Водомерные лотки. *Водомерные лотки Паршелла.* Метод измерения расхода водомерными лотками Паршелла основан на измерении количества воды, протекающего через суженное сечение канала, при этом статический напор частично переходит в динамический. Водомерный лоток Паршелла уменьшает поперечное сечение потока в горизонтальном направлении, в то же время в днище лотка имеется участок с уклоном (рис. 10.53). Статический напор измеряют в успокаивающих камерах А и В. В условиях свободного течения жидкости (т. е. когда статический напор в камере В составляет 60 % или

менее статического напора в камере А) можно получить хорошие результаты, измеряя статический напор только в камере А. В табл. 10.5 приведены значения расхода для различных величин статического напора в камере А при условии свободного течения жидкости в водомерном лотке Паршелла. Если напор в нижней камере В составляет 70 % или более, это искажает результаты измерений в верхней камере. В то же время можно добиться достаточно высокой точности и при величине затопления вплоть до 90 %, если статический напор измеряют в обеих камерах А и В и вносят поправку в величину, полученную в камере А. Значения поправки публикуются в специальных таблицах (Israelsen and Nausen, 1962).

Водомерные лотки позволяют решить многие проблемы, возникающие при применении водосливов. Увеличение в горловине лотка скорости жидкости в значительной мере исключает образование отложений. Водомерные лотки легче пропускают различные примеси, содержащиеся в потоке. В случае применения водомерных лотков характер движения потока в верхнем бьефе сравнительно слабо влияет на результаты измерения расхода или напора. Лотки имеют преимущество по сравнению с водосливами и в том отношении, что они вызывают значительно меньшую потерю напора в системе. В то же время применение водомерных лотков требует проведения специальных мероприятий по защите земляных каналов от разрушения. Кроме того, по сравнению с водосливами водомерные лотки сложнее и дороже в изготовлении.

На точность измерения водомерного лотка оказывает влияние несколько факторов, в том числе правильность его выбора и установки, уровень технического обслуживания и точность измерения статического напора. Выбор водомерного лотка предполагает определение его размера в зависимости от конкретных условий применения. При решении этой задачи задаются максимальной и минимальной величинами расхода и максимально допустимой потерей статического напора, которая является функцией гидравлического уклона канала и высоты надводного борта (т. е. расстояния от уровня воды до верхнего края стенки канала). Движение потока должно отвечать требованию свободного течения жидкости.

Пример 10.1. Выбор водомерного лотка Паршелла. Выбрать водомерный лоток для потока с расходом в диапазоне от 0,2 до 1,5 м³/с при условии, что максимальная потеря напора равна 18 см и характер движения потока отвечает требованию свободного течения жидкости. Максимально допустимая глубина в канале равна 60 см.

Решение. Поскольку максимально допустимая глубина потока перед водомерным лотком равна 60 см, статический напор h_a , замеренный на этом участке потока, не может превышать 60 см. По табл. 10.5 можно найти, что при напоре 60 см и менее и расходе 1,5 м³/с необходим водомерный лоток с шириной горловины, по крайней мере, 180 см.

Желательно поддерживать режим свободного течения жидкости. Для этого необходимо, чтобы степень затопления нижней камеры не превышала 60 % величины затопления верхней камеры; иными словами, потеря напора должна составлять, по крайней мере, 40 % величины статического напора h_a , измеренной в верхнем бьефе. Обусловленная гидравлическим уклоном канала и требованиями, предъявляемыми к водной поверхности, максимальная потеря напора не

Т а б л и ц а 10.5. Значения расхода для водомерного лотка Паршелла (в л/с) в условиях свободного течения жидкости;
 статический напор измеряют на входе потока в лоток

		Ширина лотка, см											
Напор, см		5,0	10,0	15,0	20,0	25,0	30,0	60,0	90,0	120,0	180,0	240,0	300,0
2		0,36	0,66	0,95	1,23	1,50	1,77	3,28	4,70	6,07	8,71	11,23	14,06
4		0,97	1,85	2,68	3,49	4,29	5,07	9,60	13,92	18,12	26,28	34,20	42,63
6		1,75	3,36	4,91	6,43	7,93	9,40	17,98	26,28	34,35	50,15	65,58	81,55
8		2,66	5,14	7,55	9,92	12,26	14,57	28,08	41,20	54,08	79,33	104,09	129,22
10		3,68	7,15	10,54	13,88	17,18	20,46	39,67	58,43	76,89	113,21	148,95	185,67
12		4,80	9,37	13,84	18,27	22,65	27,00	52,62	77,73	102,51	151,39	199,61	247,22
14		6,00	11,76	17,43	23,04	28,60	34,13	66,81	98,94	130,72	193,55	255,68	316,37
16		7,29	14,33	21,28	28,17	35,01	41,82	82,16	121,95	161,37	239,46	316,83	391,72
18		8,65	17,06	25,37	33,63	41,85	50,03	98,61	146,64	194,31	288,91	382,79	472,96
20		10,08	19,93	29,70	39,41	49,09	58,72	116,09	172,93	229,44	341,74	453,36	559,81
22		11,57	22,95	34,25	45,50	56,71	67,89	134,56	200,76	266,66	397,81	528,35	652,03
24		13,13	26,10	39,00	51,86	64,69	77,50	153,97	230,06	305,88	456,99	607,58	749,42
26		14,75	29,38	43,96	58,50	73,03	87,53	174,30	260,77	347,04	519,18	690,92	851,82
28		16,43	32,78	49,10	65,41	81,70	97,98	195,50	292,84	390,07	584,27	778,24	959,05
30		18,16	36,30	54,44	72,57	90,70	108,82	217,55	326,24	434,91	652,19	869,42	1070,98
32		19,94	39,93	59,95	79,97	100,01	120,05	240,43	360,93	481,51	722,85	964,37	1187,49
34		21,78	43,68	65,63	87,61	109,62	131,65	264,10	396,86	529,82	796,19	1062,98	1308,44
36		23,66	47,53	71,48	95,49	119,53	143,61	288,55	434,01	579,81	872,13	1165,16	1433,75
38		25,59	51,49	77,50	103,58	129,73	155,92	313,75	472,34	631,42	950,63	1270,85	1563,30
40		27,57	55,54	83,67	111,90	140,21	168,58	339,70	511,83	684,63	1031,61	1379,97	1697,01
42		29,60	59,70	90,00	120,43	150,96	181,57	366,37	552,46	739,39	1115,04	1492,44	1834,80
44		31,67	63,95	96,47	129,16	161,97	194,88	393,75	594,19	795,68	1200,86	1608,20	1976,57
46		33,78	68,29	103,10	138,10	173,25	208,52	421,81	637,01	853,47	1289,04	1727,20	2122,27
48		35,93	72,73	109,87	147,24	184,78	222,47	450,56	680,90	912,72	1379,51	1849,37	2271,82
50		38,12	77,25	116,78	156,57	196,57	236,72	479,97	725,83	973,42	1472,26	1974,67	2425,16

Продолжение табл. 10.5

Напор, см	Ширина лотка, см											
	5,0	10,0	15,0	20,0	25,0	30,0	60,0	90,0	120,0	180,0	240,0	300,0
52	40,36	81,86	123,83	166,10	208,59	251,28	510,04	771,79	1035,54	1567,23	2103,05	2582,23
54	42,63	86,56	131,01	175,81	220,86	266,13	540,74	818,76	1099,05	1664,41	2234,45	2742,96
56	44,94	91,34	138,33	185,70	233,36	281,27	572,08	866,73	1163,93	1763,74	2368,83	2907,30
58	47,29	96,21	145,77	195,77	246,10	296,69	604,04	915,67	1230,17	1865,20	2506,15	3075,20
60	49,68	101,15	153,35	206,02	259,06	312,39	636,60	965,58	1297,73	1968,76	2646,38	3246,62
62	52,10	106,18	161,05	216,45	272,25	328,37	669,77	1016,44	1366,61	2074,39	2789,46	3421,49
64	54,56	111,28	168,87	227,05	285,56	344,62	703,54	1068,24	1436,79	2182,07	2935,37	3599,79
66	57,05	116,46	176,82	237,81	299,28	361,14	737,88	1120,95	1508,24	2291,76	3084,07	3781,46
68	59,58	121,72	184,88	248,74	313,12	377,92	772,81	1174,58	1580,95	2403,45	3235,52	3966,46
70	62,14	127,05	193,07	259,84	327,17	394,96	808,30	1229,11	1654,91	2517,10	3389,70	4154,76
72	64,74	132,45	201,37	271,09	341,43	412,26	844,35	1284,53	1730,10	2632,70	3546,57	4346,31
74	67,37	137,93	209,78	282,51	355,89	429,80	880,96	1340,82	1806,50	2750,23	3706,10	4541,08
76	70,03	143,47	218,31	294,08	370,56	447,60	918,12	1397,99	1884,11	2869,65	3868,26	4739,04
78	72,72	149,09	226,95	305,81	385,42	465,64	955,81	1456,00	1962,90	2990,96	4033,04	4940,15
80	75,44	154,78	235,70	317,69	400,48	483,93	994,04	1514,87	2042,87	3114,12	4200,39	5144,38
82	78,20	160,53	244,56	329,72	415,74	502,45	1032,80	1574,57	2123,99	3239,13	4370,30	5351,69
84	80,98	166,35	253,53	341,90	431,19	521,22	1072,08	1635,11	2206,27	3365,97	4542,73	5562,06
86	83,79	172,24	262,60	354,23	446,83	540,21	1111,88	1696,46	2289,69	3494,61	4717,68	5775,46
88	86,64	178,20	271,78	366,70	462,66	559,44	1152,19	1758,63	2374,24	3625,04	4895,10	5991,85
90	89,51	184,22	281,06	379,32	478,61	578,90	1193,00	1821,60	2459,90	3757,24	5074,99	6211,22
92	92,42	190,30	290,44	392,08	494,87	598,58	1234,32	1885,36	2546,67	3891,20	5257,31	6433,53
94	95,35	196,45	299,93	404,99	511,25	618,49	1276,13	1949,92	2634,54	4026,90	5442,05	6658,76
96	98,31	202,66	309,51	418,03	527,81	638,62	1318,44	2015,26	2723,49	4164,32	5629,19	6886,88
98	101,30	208,94	319,19	431,21	544,55	658,97	1361,23	2081,37	2813,51	4303,46	5818,71	7117,88
100	104,31	215,27	328,98	444,52	561,47	679,54	1404,50	2148,24	2904,60	4444,30	6010,58	7351,72

должна превышать 18 см. Необходимо проверить, достаточна ли ширина горловины выбираемого водомерного лотка для того, чтобы обеспечить режим свободного течения жидкости и потерю напора в пределах заданной величины (18 см).

Ниже приведены значения ширины горловины водомерного лотка в зависимости от величины статического напора в верхнем бьефе для максимального расхода (1,5 м³/с).

Ширина горловины, см	h_a , см	Δh , см
180	50	20,0
240	42	16,8

Потеря напора в условиях свободного течения жидкости

$$40 \% (h_a) = \Delta h.$$

Таким образом, при потере напора, равной 18 см или менее, и заданном расходе ширина горловины водомерного лотка составит 240 см.

Глубина воды, измеренная в верхней камере, для выбранного водомерного лотка не должна превышать 60 см. Следовательно, высота порога будет равна 60 см — потеря напора при максимальном расходе = высота порога;

$$60 - 16,8 = 43,2 \text{ см от нижней отметки дна лотка.}$$

Желательно наличие надводного борта в верхнем бьефе канала. Иногда для этого уменьшают высоту порога, однако не следует слишком опускать порог, так как это может привести к нарушению режима свободного течения жидкости.

Промышленностью выпускаются водомерные лотки Паршелла стандартных размеров. Обычно они изготавливаются из стекловолокна или других подобных материалов. Однако иногда водомерный лоток Паршелла необходимо делать по месту. В табл. 10.6 и на

Таблица 10.6. Размеры лотка Паршелла (в см) (Christiansen, 1935)

Ширина горловины, см	A	B	C	D	E	F	G	K	N	X	Y	Номер рисунка
2,5	36	35	9	17	23	8	20	2	0,3	0,8	1	10.54
5,0	42	41	14	21	25	11	25	2	1,7	1,6	2,5	10.54
7,5	47	46	18	26	38	15	30	2,5	5,7	2,5	3,8	10.54
15,0	62	61	39	39	46	30	61	7,6	11,4	5,1	7,6	10.54
23,0	88	86	38	57	61	30	46	7,6	11,4	5,1	7,6	10.54
30	137	134	61	85								10.55
61	152	150	91	121								10.55
91	168	165	122	157								10.55
122	183	179	152	194								10.55
152	198	194	183	230								10.55
183	213	209	213	266								10.55
213	229	224	244	303								10.55
244	244	239	274	340								10.55
305	274	268	335	412								10.55

рис. 10.54 и 10.55 приведены все стандартные размеры водомерных лотков Паршелла. Они могут быть изготовлены из бетона, кирпича, дерева, металла или других материалов. Особое внимание при

сооружении лотков необходимо уделять соблюдению основных размеров.

Погрешность при работе водомерных лотков Паршелла не превышает 5 %. Вероятно, ее можно понизить более тщательной калибровкой либо увеличением точности измерений напора. Однако и 5 % является вполне приемлемой погрешностью для измерений, выполняемых на предприятиях по разведению водных организмов.

Водомерные лотки трапецевидного сечения. Принципиальная схема водомерного лотка этого типа показана на рис. 10.56. Лоток представляет собой искусственно суженную часть канала с поперечным сечением трапецевидной формы и плоским дном. В результате сужения поперечного сечения потока скорость его на этом участке увеличивается. Потеря напора в водомерном лотке прямо пропорциональна скорости протекающего вещества, следовательно, потеря напора может служить мерой расхода.

Показания для водомерного лотка данного типа не зависят от состояния водной поверхности на подходе к нему. Это позволяет измерять расходы, колеблющиеся в широких пределах при относительно небольшой потере напора. В отличие от водомерных лотков прямоугольного сечения, водомерные лотки трапецевидного сечения не требуют высокой точности изготовления. В то же время точность измерений водомерных лотков трапецевидного сечения

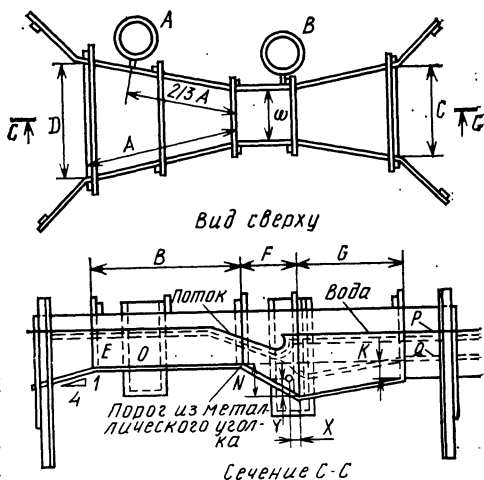


Рис. 10.54. Размеры водомерного лотка Паршелла (Christiansen, 1935)

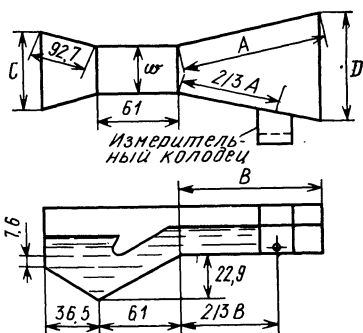


Рис. 10.55. Размеры водомерного лотка Паршелла при ширине горловины 30 см или более. Все размеры даны в сантиметрах (Christiansen, 1935)

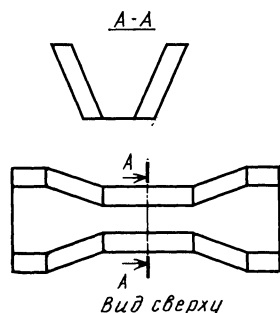


Рис. 10.56. Водослив трапецевидного сечения

несколько ниже, что объясняется сравнительно небольшим перепадом напора. Основное преимущество водомерного лотка рассматриваемого типа состоит в том, что форма его поперечного сечения совпадает с основной формой поперечного сечения большинства открытых каналов.

Расход водомерного лотка трапециевидного сечения определяется по формуле (Robinson and Chamberlain, 1960)

$$Q = CA_1 \sqrt{2g(h_1 - h_2)} \quad , \quad (10.33)$$

где Q — расход; C — коэффициент расхода, которым учитывается геометрия конструкции лотка; A — площадь поперечного сечения лотка со стороны входа потока; g — ускорение силы тяжести; h_1 — напор перед водомерным лотком; h_2 — напор в горловине лотка.

Коэффициент C зависит от рода протекающей жидкости, геометрической формы водомерного лотка, скорости и глубины потока. В связи с этим формула (10.33) имеет ограниченное практическое применение. Водомерные лотки трапециевидного сечения необходимо подвергать индивидуальной градуировке в конкретных условиях применения.

REFERENCES

ASME — American Society of Mechanical Engineers (1959). Instruments and Apparatus. Part 5, Measurement of Quality of Materials. Chapter 4, Flow Measurement. Supplement to ASME Power Test Codes.

Beckwith, T. G. and N. Lewis Buck (1961). Mechanical Measurements. Addison—Wesley, Reading, Mass.

Christiansen, J. E. (1935). Measuring Water for Irrigation. California Agricultural Experiment Station Bulletin 588.

Eckman, Donald P. (1950). Industrial Instrumentation. Wiley, New York.

Engineering Field Manual for Conservation Practices (1969). U.S. Department of Agriculture, Soil Conservation Service, Washington, D. C.

Fluid Meters, Their Theory and Application, 5th ed. (1959) Report of American Society of Mechanical Engineers Research Committee on Fluid Meters. American Society of Mechanical Engineers, New York.

Frevert, Richard K., Glenn O. Schwab, Talcott W. Edminster, and Kenneth K. Barnes (1962). Soil and Water Conservation Engineering, 3rd printing. Wiley, New York.

Fribance, Austin E. (1962). Industrial Instrumentation Fundamentals. McGraw—Hill, New York.

Israelsen, Orson W. and Vaughn E. Hansen (1962). Irrigation Principles and Practices. Wiley, New York.

King, Horace W., Chester O. Wisler, and James G. Woodburn (1948). Hydraulics. Wiley, New York.

Norton, Harry N. (1969). Handbook of Transducers for Electronic Measuring Systems. Prentice—Hall, Englewood Cliffs, N. J.

Parshall, R. L. (1950). Measuring Water in Irrigation Channels with Parshall Flumes and Small Weirs. U.S. Department of Agriculture, Circular No. 843, Washington, D. C.

Robinson, A. R. (1959). Trapezoidal Measuring Flumes for Determining Discharges in Steep Ephemeral Streams. Colorado State University Research Foundation, Civil Engineering Section. Fort Collins.

Robinson, A. R. (1968). Trapezoidal Flumes for Measuring Flow in Irrigation Channels. Agricultural Research Service Publication ARS 41—140, Washington, D. C.

Robinson, A. R. and A. R. Chamberlain (1960). Trapezoidal Flumes for Open Channel Flow Measurement. Transactions of the American Society of Agricultural Engineers 3 (2): 120—124.

Schoenborn, E. M. and A. P. Colburn (1939). The Flow Mechanism and Performance of the Rotameter. Transactions of the American Institute of Chemical Engineers 35 (3): 359.

Streeter, Victor L. (1962). Fluid Mechanics. McGraw—Hill, New York.
U.S. Department of Agriculture Farmer's Bulletin 813.

Глава 11. НАСОСЫ

Насосами называются машины, способные сообщать жидкостям энергию. Течение воды и других жидкостей обусловлено перепадом энергии, во время движения полный запас энергии жидкости уменьшается. При проектировании и сооружении предприятий по разведению водных организмов часто необходимо перемещать жидкость против энергетического градиента, а также подавать жидкость снизу вверх, т. е. против гравитационного градиента. Насосы применяются также для создания напора в гидравлических системах, когда необходимо, чтобы жидкость совершала работу, например приводила во вращение вал или толкала поршень гидроцилиндра.

В современном промышленном производстве насосы, вероятно, применяются чаще, чем какие-либо другие механизмы. Насосы работают достаточно эффективно и надежно при условии, что они правильно подобраны, а в процессе эксплуатации обеспечены надлежащим техническим обслуживанием. В этой главе рассмотрены различные типы насосов, классифицированные по принципу действия, техническим характеристикам и возможности применения в различных гидравлических системах. Некоторое внимание уделено выбору насоса и привода. Автор не ставил перед собой задачу описать все типы насосов, ниже рассмотрены преимущественно те насосы, которые находят применение на предприятиях по разведению водных организмов. Правильный выбор типа насоса очень важен, так как стоимость перекачивания воды может оказаться основной статьей расходов для этих предприятий. При неудачном выборе насоса перекачивание жидкости может обойтись вдвое или даже втрое дороже, не говоря уже о значительном увеличении расходов на техническое обслуживание и устранение последствий поломок.

ОПРЕДЕЛЕНИЯ И КЛАССИФИКАЦИЯ НАСОСОВ

Прежде чем приступить к подробному описанию типов насосов, введем несколько основных определений.

Свободная поверхность воды — это водная поверхность, сообщаящаяся с атмосферой либо испытывающая только атмосферное давление. Примером свободной поверхности может служить водная поверхность в резервуаре без крышки.

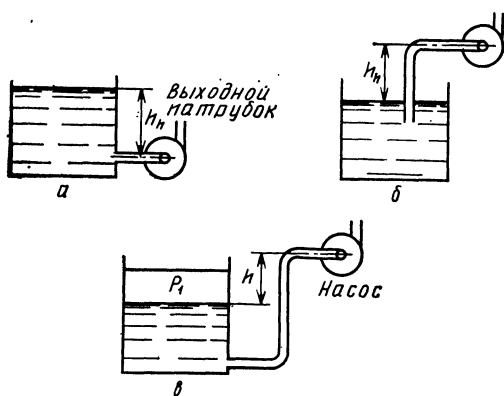


Рис. 11.1. Схемы расчета располагаемого избыточного напора (РИН) на входе насоса; различные варианты расположения насоса:

а — РИН положительный; *б* — РИН отрицательный; *в* — жидкость в резервуаре находится под давлением

Располагаемый избыточный напор (РИН) — это разность давления жидкости на входе в насос и давления насыщенного пара жидкости. На рис. 11.1 показаны различные способы определения РИН. Если всасывающий патрубок находится ниже уровня открытой поверхности забираемой воды (рис. 11.1, *а*),

$$РИН = h_b - h_v - h_f + h_h, \quad (11.1)$$

где h_b — барометрическое давление, Па; h_v — давление насыщающих паров жидкости при ее температуре, Па; h_f — потери на трение и вязкостные потери на входе насоса, Па; h_h — гидростатический напор на входе насоса, Па.

Если всасывающий патрубок насоса расположен выше уровня открытой поверхности забираемой воды (рис. 11.1, *б*), уравнение для определения (11.1) принимает вид

$$РИН = h_b - h_v - h_f - h_h. \quad (11.2)$$

Гидростатический напор на входе насоса вводится в формулу (11.1) с положительным знаком, а в формулу (11.2) — с отрицательным.

Если насос забирает воду из резервуара, в котором жидкость находится под давлением (рис. 11.1, *в*), то формула для определения *РИН* сходна с формулой (11.2) и отличается от нее только тем, что давление, обозначенное на схеме h , определяется здесь как разность между статическим давлением P_1 и напором h_h . Очевидно, что давление водяного столба равно γh (γ — удельный вес жидкости) (см. главу 9).

$$РИН = h_b - h_v - h_f - h_h + P_1. \quad (11.3)$$

Если осевая линия насоса окажется ниже уровня забираемой воды, то величина h_h войдет в уравнение (11.3) с положительным знаком.

Гидростатический напор — полный напор насоса, необходимый для преодоления сопротивления.

$$\text{Полный гидростатический напор} = \gamma h + P_2 + (v_2^2/2g) + h_f \pm РИН, \quad (11.4)$$

где h — расстояние по вертикали между осевой линией насоса и самым высоким уровнем жидкости в системе; γ — удельный вес жидкости; P_2 — статическое давление на поверхности жидкости в самой верхней точке системы; $v_2^2/2g$ — скоростной, или динамический, напор в выходном патрубке насоса; h_f — потери

напора на трение во всей гидравлической системе; $P_{ИН}$ — располагаемый избыточный напор (входит в уравнение со знаком «минус», если он выше атмосферного давления, и со знаком «плюс», если ниже атмосферного давления).

Полный гидростатический напор, развиваемый насосом, определяют как напор, необходимый для преодоления всех входящих в уравнение (11.4) составляющих при данном расходе жидкости. Полный гидростатический напор зависит от расхода жидкости, так как скоростной напор, потери на трение и РИН изменяются в зависимости от расхода.

Потребляемая мощность — это используемая мощность привода или мощность, потребляемая насосом.

Мощность на входе насоса ($МВН$ в Вт) — это энергия, сообщаемая жидкости в единицу времени

$$МВН = CQh, \quad (11.5)$$

где C — постоянная, учитывающая единицы измерения и плотность жидкости; Q — расход, $м^3/с$; h — полный гидростатический напор, $м$.

Для пресной воды с удельным весом $1 г/см^3$ уравнение (11.5) принимает вид

$$МВН = 9800Qh, \quad (11.6)$$

Коэффициент полезного действия насоса определяется по формуле

$$\epsilon = \frac{\text{выходная мощность}}{\text{входная мощность}} = \frac{\text{полезная мощность}}{\text{потребляемая мощность}}. \quad (11.7)$$

В настоящее время выпускаются разнообразные насосы как однокорпусного, так и многокорпусного назначения. Предприятия по разведению водных организмов заинтересованы в первую очередь в установках для перекачивания пресной, солоноватой или морской воды, поэтому ниже рассмотрены только водяные насосы.



Рис. 11.2. Классификация насосов

Как правило, эти машины можно разделить на четыре группы: центробежные, роторные, поршневые насосы и эрлифты. На рис. 11.2 приведена классификация насосов.

ЦЕНТРОБЕЖНЫЕ НАСОСЫ

Большинство центробежных насосов отвечает требованиям предприятий по разведению водных организмов. На рис. 11.3 показаны основные конструктивные элементы центробежного насоса.

Электродвигатель приводит во вращение вал, на который насажено рабочее колесо. Лопасті рабочего колеса направляют поток воды и сообщают ему энергию. Каждая частица потока, попадая на рабочее колесо, под действием центробежной силы начинает двигаться с ускорением в направлении по радиусу от центра рабочего колеса. Когда впускной патрубок и внутренняя полость насоса заполнены водой (т. е. насос залит), ускоренное движение жидкости от центра рабочего колеса вызывает уменьшение давления в этой зоне, тем самым создаются условия для всасывания через входной патрубок следующей порции воды.

Скорость жидкости на выходе из рабочего колеса высокая. Как только жидкость покидает рабочее колесо, ее скорость резко снижается, скоростной (динамический) напор преобразуется в гидростатический. Разность между давлением на выходе из насоса и на входе в него зависит от характеристик насоса. Давление на выходе из насоса зависит от давления на входе и технических характеристик насоса.

На рис. 11.3 показана набивка сальника, которая образует герметичное уплотнение вокруг вала, предотвращая просачивание воды вдоль вала из внутренней полости насоса. В центробежных насосах применяется множество типов и конструкций уплотнений и уплотнительных устройств. Поскольку на каждом предприятии-изготовителе насосов разрабатывается собственная конструкция уплотнения в зависимости от предполагаемой области применения

насоса, описать все технические решения невозможно. То же самое относится и к подшипниковым узлам. Общим для всех конструкций является применение подшипников со встроенным уплотнением или смазывающихся подшипников, в которых используются либо смазочные масла, либо водяная смазка. Подшипники со встроенным уплотнением и с водяной смазкой наилучшим образом отвечают требованиям предприятий по разведению водных организмов, так как подшипники, смазываю-

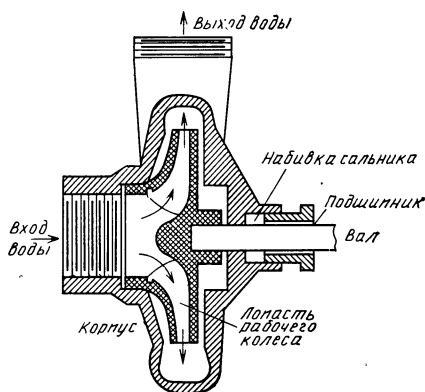


Рис. 11.3. Центробежный насос

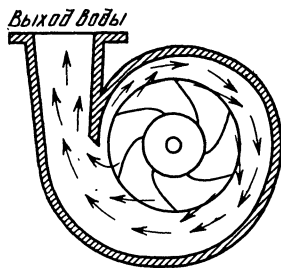


Рис. 11.4. Центробежный насос со спиральной нагнетательной камерой

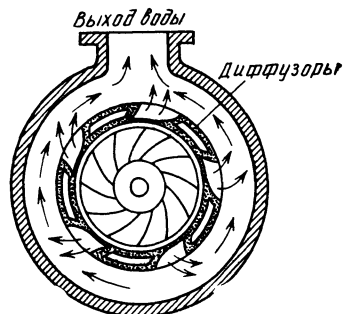


Рис. 11.5. Диффузорный центробежный насос

щиеся маслом или консистентной смазкой, хотя и незначительно, но все же пропускают эти вещества в воду. Масло и консистентная смазка в лучшем случае нежелательны в воде, предназначенной для разведения водных организмов, в худшем случае — просто токсичны.

Центробежные насосы со спиральной нагнетательной камерой. В насосах со спиральной нагнетательной камерой, так же как и в других центробежных насосах, энергия сообщается рабочему телу — жидкости за счет возникновения центробежного ускорения. Своим названием этот тип насоса обязан внутренней полости корпуса, которая выполнена в виде завитка спирали. Основное назначение спиральной камеры — собрать жидкость, покинувшую рабочее колесо, и направить ее в напорную линию. Вблизи рабочего колеса скорость жидкости резко уменьшается, дальнейшее снижение скорости жидкости в спиральной камере происходит значительно медленнее за счет плавного расширения ее сечения по мере приближения к выходному отверстию. Такой характер течения жидкости обеспечивает уменьшение внутренних энергетических потерь.

Насосы со спиральной нагнетательной камерой находят широкое применение, так как они отличаются простотой конструкции и могут работать с жидкостями, содержащими некоторое количество твердых примесей. Обычно рабочее колесо этого насоса имеет лопасти криволинейной формы (рис. 11.4), этим обеспечивается уменьшение внутренних потерь, связанных с вихреобразованием и излишней циркуляцией жидкости, КПД машины возрастает. К недостаткам конструкции насоса относятся неравномерность гидравлической нагрузки на несущие подшипники рабочего колеса. В насосах с двусторонним подводом жидкости, в которых рабочее колесо как бы сдвоено, дисбаланс устраняется. При двустороннем подводе жидкости насос имеет два всасывающих патрубка для входа воды и один для выхода.

Диффузорные центробежные насосы. В насосах диффузорного типа (рис. 11.5) рабочее колесо установлено концентрично с кор-

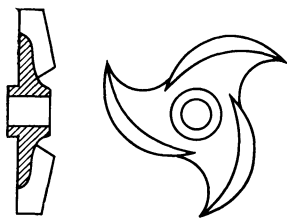


Рис. 11.6. Рабочее колесо открытого типа (Frevort et al., 1962)

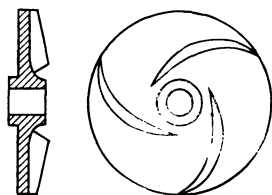


Рис. 11.7. Рабочее колесо полузакрытого типа (Frevort et al., 1962)

пусом. Лопатки диффузора прикреплены к корпусу насоса вокруг рабочего колеса. Конструкция лопаток предусматривает плавный переход скоростного напора жидкости в гидростатический. Уменьшая потери, связанные с вихреобразованием, и другие энергетические потери, они создают условия для развития более высоких гидростатических напоров и КПД.

Применение диффузорных насосов целесообразно в тех случаях, когда необходимо обеспечить большой напор, а также при работе с жидкостями, почти не содержащими твердых примесей. Эти насосы сравнительно легко засоряются механическими примесями. Крупные диффузорные насосы характеризуются высоким КПД, вплоть до 90%. В насосах этого типа гидравлическая нагрузка на подшипники более равномерна, чем, например, в насосах со спиральной нагнетательной камерой, следовательно, общая нагрузка на подшипники меньше.

Конструкция рабочего колеса. Технические характеристики насосов со спиральной нагнетательной камерой и диффузорных насосов определяются главным образом конструкцией рабочего колеса. Особо важное значение имеют конфигурация лопастей, геометрические параметры проточных частей рабочего колеса, а также тип рабочего колеса. Можно выделить три основных типа рабочих колес: открытые, полузакрытые и закрытые (рис. 11.6, 11.7 и 11.8). Лопасти рабочего колеса открытого типа прикреплены к передней поверхности несущей пластины, причем сама пластина должна быть как можно меньше. Большие сечения межлопастных каналов рабочего колеса свободно пропускают твердые частицы, содержащиеся в воде. Обычно насосы с рабочими колесами открытого типа применяют при работе с загрязненными механическими примесями жидкостями. КПД насосов с рабочими колесами открытого типа, как правило, ниже КПД насосов с рабочими колесами других типов.

Лопасти рабочего колеса полузакрытого типа (рис. 11.7) прикреплены к передней поверхности круглого несущего диска. Эти колеса обеспечивают более высокий КПД по сравнению с рабочими колесами открытого типа, однако они хуже пропускают механические частицы, содержащиеся в воде.

Лопасти рабочего колеса закрытого типа заключены между двумя несущими пластинами (рис. 11.8). Эти колеса отличаются

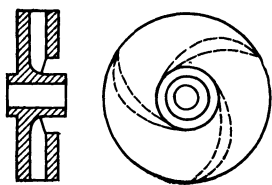


Рис. 11.8. Рабочее колесо закрытого типа (Frevert et al., 1962)

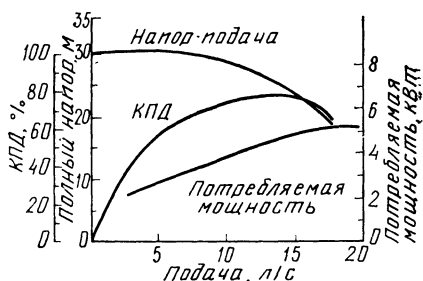


Рис. 11.9. Характеристики центробежного насоса

высоким КПД и применяются во всех случаях, когда позволяют условия. Большинство специалистов сходятся на том, что рабочие колеса закрытого типа изнашиваются быстрее при работе с загрязненными жидкостями, чем рабочие колеса открытого или полузакрытого типа. Однако есть и другая точка зрения (Doolin, 1972). В каждом конкретном случае необходим индивидуальный подход, а также соблюдение рекомендаций заводов-изготовителей.

Рабочие характеристики. Под характеристиками насосов подразумевают графические зависимости напора, КПД и потребляемой мощности от подачи. Для каждого насоса эти характеристики различны, и, кроме того, после определенного периода эксплуатации насоса характеристики изменяются из-за износа внутренних частей. Несмотря на различия между индивидуальными характеристиками отдельных насосов и изменения условий работы, характеристики насосов сходной конструкции будут выражаться сходными кривыми. Износ оказывает большое влияние в первую очередь на КПД насоса, который начинает заметно снижаться. Кроме того, насос уже не в состоянии развивать достаточный гидростатический напор.

На рис. 11.9 приведены рабочие характеристики центробежного насоса со спиральной нагнетательной камерой. Кривая напор — подача отражает зависимость между максимальным напором и подачей при постоянной частоте вращения данного насоса. Для центробежных насосов характерно уменьшение подачи по мере увеличения требуемого напора. Кривая КПД определяет КПД насоса для разных режимов работы. Чтобы эксплуатационные расходы были минимальными, насос должен работать с максимальным КПД. Мощность, потребляемая насосом при различных условиях работы, находится по кривой потребляемой мощности. Как видно из этой кривой, насос потребляет максимальную мощность, когда его подача несколько превышает величину подачи, соответствующую максимальному КПД. Для центробежного насоса важным является то, что величина потребляемой мощности уменьшается по мере уменьшения расхода от точки, соответствующей максимальному КПД. Это позволяет, не опасаясь перегрузки при-

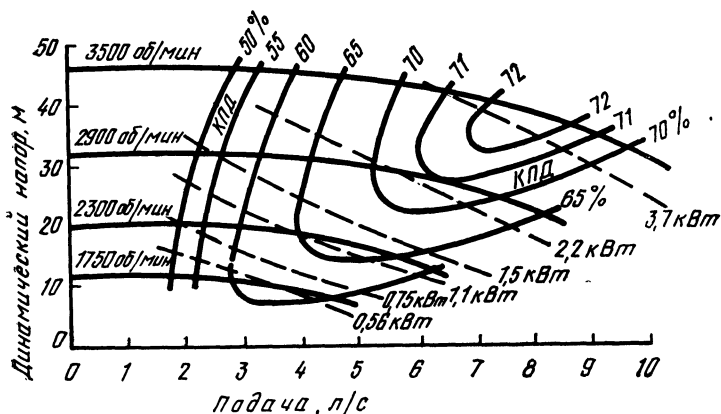


Рис. 11.10. Характеристики центробежного насоса при различных частотах вращения с рабочим колесом постоянного диаметра

водного устройства, регулировать производительность насоса дросселированием (т. е. уменьшать поток на выходе путем сужения сечения выходного трубопровода). Метод дросселирования выходного потока достаточно распространен в практике эксплуатации центробежных насосов, однако при этом снижается КПД. Предприятиям по культивированию водных организмов в очень редких случаях требуются крупногабаритные насосы, которые нуждаются в регулировании подачи.

Приведенные на рис. 11.9 характеристики относятся к центробежному насосу, работающему с постоянной скоростью. Однако

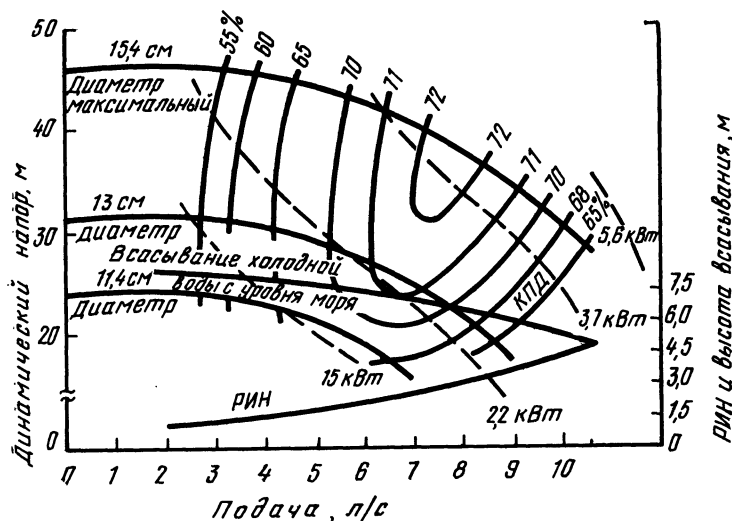


Рис. 11.11. Характеристики центробежного насоса с рабочими колесами разного диаметра, установленными в одном корпусе. Все рабочие колеса вращаются с одинаковой частотой

часто характеристики насоса задаются для разных скоростей (рис. 11.10). При уменьшении частоты вращения рабочего колеса уменьшаются развиваемый им напор и подача. На рис. 11.11 показан еще один вариант изображения характеристик центробежного насоса. Здесь частота вращения рабочего колеса поддерживается постоянной, а характеристики насоса обусловлены различными геометрическими параметрами рабочего колеса.

Рабочие характеристики центробежных насосов отражают взаимосвязь основных параметров: напора, подачи, КПД, частоты вращения, диаметра рабочего колеса и потребляемой мощности. Как видно из рис. 11.9—11.11, любая из кривых может отражать сложную функциональную зависимость между этими шестью параметрами, один из которых считается постоянным. Набор переменных величин зависит от предполагаемой области применения насоса. Например, характеристики насосов с ременной передачей задаются таким образом, чтобы можно было установить взаимосвязь скорости как переменной величины с остальными параметрами при условии, что диаметр рабочего колеса остается постоянным (см. рис. 11.10), так как в этом насосе можно регулировать скорость вращения, меняя шкивы ременной передачи.

В дополнение к перечисленным выше параметрам на некоторых графиках приводятся еще две функции: высота всасывания насоса для идеальных условий, когда он качает холодную воду с уровня моря, и необходимый РИН (см. рис. 11.11). Точка пересечения этих кривых соответствует максимальной величине подачи, достижимой в идеальных условиях для данного насоса. Если поверхность воды находится выше уровня моря или условия работы насоса со стороны впуска отличаются от расчетных, которые легли в основу построения кривой РИН (например, всасывающая труба длиннее), тогда величина максимальной подачи насоса будет меньше по сравнению с идеальными условиями.

Технические характеристики обусловлены в первую очередь конструкцией рабочего колеса, размеры которого ограничены габаритами корпуса насоса. На рис. 11.10 и 11.11 четко прослеживается влияние частоты вращения рабочего колеса и его диаметра на технические характеристики насоса. Изменения технических характеристик в определенном диапазоне могут быть выражены математически. Для одного и того же насоса, работающего в различных условиях, справедливы следующие соотношения:

$$Q_1/Q_2 = N_1/N_2 = D_1/D_2 = W_1/W_2; \quad (11.8)$$

$$h_1/h_2 = (N_1/N_2)^2 = (D_1/D_2)^2 = (W_1/W_2)^2; \quad (11.9)$$

$$P_1/P_2 = (N_1/N_2)^3 = (D_1/D_2)^3 = (W_1/W_2)^3, \quad (11.10)$$

где Q — подача; N — частота вращения рабочего колеса; D — диаметр рабочего колеса; W — ширина рабочего колеса; P — потребляемая мощность. Индексы 1 и 2 относятся к соответствующим режимам работы.

Уравнение (11.8) получено для насоса, подача которого менялась пропорционально скорости жидкости, а та в свою очередь

пропорциональна частоте вращения рабочего колеса. Зависимость между геометрическими параметрами рабочего колеса и напором легла в основу уравнения (11.9). Мощность пропорциональна подаче Q и противодействующей силе или напору h . Уравнения (11.8) и (11.9) позволяют заключить, что Q пропорциональна N , а h — N^2 . Таким образом, получено уравнение 11.10.

Пример 11.1. Насос, работающий с частотой вращения 1600 об/мин, создает напор 50 м при подаче 10 л/с, при этом потребляемая мощность составляет 5000 Вт. Каковы будут значения напора, подачи и потребляемой мощности, если частота вращения увеличится до 2500 об/мин?

$$Q_1/Q_2 = N_1/N_2;$$

$$(10 \text{ л/с})/Q_2 = 1600/2500.$$

Новое значение подачи

$$Q_2 = 15,63 \text{ л/с};$$

$$h_1/h_2 = (N_1/N_2)^2;$$

$$50 \text{ м}/h_2 = (1600/2500)^2.$$

Полученный напор

$$h_2 = 122,07 \text{ м};$$

$$P_1/P_2 = (N_1/N_2)^3;$$

$$5600/P_2 = (1600/2500)^3.$$

Потребляемая мощность

$$P_2 = 21,362 \text{ Вт}.$$

Часто бывает полезно сравнить рабочие характеристики геометрически подобных насосов. Это можно сделать с помощью следующей системы уравнений:

$$Q_1/Q_2 = (D_1/D_2)^3; \quad (11.11)$$

$$h_1/h_2 = (D_1/D_2)^2; \quad (11.12)$$

$$P_1/P_2 = (D_1/D_2)^5. \quad (11.13)$$

Производительность насосов пропорциональна окружной скорости и площади периферийного сечения рабочего колеса. Окружная скорость прямо пропорциональна диаметру рабочего колеса. Площади периферийного сечения рабочих колес геометрически подобных насосов пропорциональны соотношению квадратов диаметров этих колес. Отсюда можно заключить, что подача пропорциональна диаметру рабочего колеса в кубе [уравнение (11.11)]. Сходным образом, поскольку напор пропорционален квадрату диаметра колеса, получается уравнение (11.12). Потребляемая мощность зависит от произведения расхода на напор. Таким образом, уравнение (11.13) вытекает из уравнений (11.11) и (11.12).

Пример 11.2. Насос с рабочим колесом диаметром 6 см подает 3 л воды в секунду, преодолевая напор 20 м. Каковы должны быть диаметр рабочего колеса и потребляемая мощность геометрически подобного насоса, если требуемая подача составляет 5 л/с?

$$Q_1/Q_2 = (D_1/D_2)^3;$$

$$(3 \text{ л/с})/(5 \text{ л/с}) = (6/\alpha_2)^3; D_2^3 = 360.$$

Диаметр рабочего колеса второго насоса

$$D_2 = 7,11 \text{ см}.$$

Чтобы подсчитать потребляемую мощность второго насоса, необходимо определить новое значение напора h_2 :

$$h_1/h_2 = (D_1/D_2)^2;$$

$$20 \text{ м}/h_2 = (6/7,11)^2;$$

$$h_2 = 28,08 \text{ м}.$$

Потребляемая мощность

$$P = Qh,$$

где Q измеряется в ньютонах в секунду, а h — в метрах.

$$5 \text{ л/с} = 5 \text{ кг/с} = 49 \text{ Н/с};$$

$$P_2 = (49 \text{ Н/с}) (28,08 \text{ м});$$

$$P_2 = 1376,8 \text{ Вт}.$$

С помощью уравнений (11.11), (11.12) и (11.13) для геометрически подобных насосов можно подсчитать a , h и P как функции диаметров рабочих колес. Часто бывает необходимо определить суммарное влияние изменения одновременно диаметра и скорости на напор и подачу геометрически подобных насосов. Приведенные выше соотношения можно объединить в следующую систему уравнений:

$$Q_1/Q_2 = (N_1/N_2) (D_1/D_2)^3; \quad (11.14)$$

$$h_1/h_2 = (N_1/N_2)^2 (D_1/D_2)^2; \quad (11.15)$$

$$P_1/P_2 = (N_1/N_2)^3 (D_1/D_2)^5. \quad (11.16)$$

Чтобы получить выражение, связывающее N или D с Q и h , N или D с Q и P , а также D или N с Q и P , достаточно решить систему из двух любых уравнений (11.14)—(11.16). Так, уравнения (11.17) и (11.18) получены путем решения системы уравнений (11.14) и (11.15):

$$D_2 = D_1 (Q_2/Q_1)^{1/2} (h_1/h_2)^{1/4}; \quad (11.17)$$

$$N_2 = N_1 (Q_1/Q_2)^{1/2} (h_2/h_1)^{3/4}. \quad (11.18)$$

Пример 11.3. На предприятии по культивированию водных организмов применяется насос со спиральной нагнетательной камерой, диаметр рабочего колеса 6 см, подача 3 л/с, напор 20 м, частота вращения колеса 1000 об/мин. Однако предприятие нуждается в насосе, который будет перекачивать 8 л/с, развивая напор 35 м. Если будет приобретен насос, геометрически подобный имеющемуся, то каковы должны быть диаметр и частота вращения колеса нового насоса?

$$D_2 = D_1 (Q_2/Q_1)^{1/2} (h_1/h_2)^{1/4};$$

$$D_2 = 6 [(8 \text{ л/с})/(3 \text{ л/с})]^{1/2} (20 \text{ м}/35 \text{ м})^{1/4};$$

$$D_2 = 6 (1,63) (0,87);$$

$$D_2 = 8,52 \text{ см};$$

$$N_2 = N_1 (Q_1/Q_2)^{1/2} (h_2/h_1)^{3/4};$$

$$N_2 = 1000 (3/8)^{1/2} (35/20)^{3/4};$$

$$N_2 = 1000 (0,61) (1,52);$$

$$N_2 = 928 \text{ об/мин}.$$

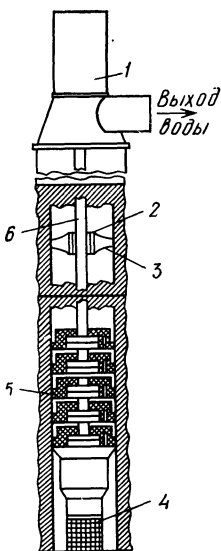
Таким образом, диаметр рабочего колеса нового насоса должен составлять 8,5 см, частота вращения — 928 об/мин.

ПОГРУЖНЫЕ ТУРБОНАСОСЫ

Погружные турбонасосы являются многоступенчатыми и могут быть спиральными или диффузорными. Их не следует смешивать с регенеративными турбонасосами, которые будут описаны ниже. В настоящее время существует две основные конструкции погружного турбонасоса. Насос первой конструкции (рис. 11.12) устанавливается на дне скважины и соединяется трансмиссионным валом с приводом, расположенным над скважиной на уровне земли или в специальном приемке. Область применения насосов этой конструкции ограничена, так как, несмотря на то что они могут работать в шахтах глубиной несколько сотен метров, необходимую прочность трансмиссионного вала такого размера невозможно обеспечить без увеличения его веса. Кроме того, насосы такой конструкции не годятся для наклонных скважин, так как постоянный прогиб трансмиссионного вала при вращении приводит к его поломкам.

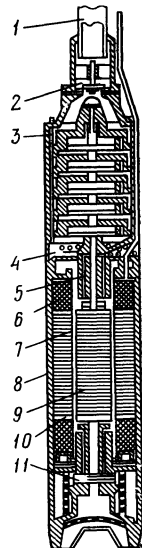
В соответствии с другой конструкцией погружного турбонасоса (рис. 11.13) насос и привод (электродвигатель) опущены на дно скважины. Такие насосы могут применяться в любых скважинах диаметром от 10 см и более. Эти насосы можно применять и в наклонных скважинах, так как вдоль ствола пропускаются только силовые кабели. Глубина скважины, как правило, неограниченна, так как промышленность выпускает насосы, предназначенные для работы в скважинах глубиной до 1000 м.

Насосные установки обеих конструкций, по существу, представляют собой несколько последовательно включенных обычных одноступенчатых насосов, рабочие колеса которых расположены на одном валу. Самая нижняя ступень забирает воду из скважины



←
Рис. 11.12. Погружной турбонасос с приводом, расположенным на поверхности:

1 — электродвигатель; 2 — упруго закрепленный подшипник; 3 — опора подшипника; 4 — фильтр-сетка; 5 — рабочие колеса; 6 — трансмиссионный вал



→
Рис. 11.13. Погружной турбонасос, работающий под водой:

1 — вертикальный трубопровод; 2 — запорный клапан; 3 — рабочее колесо; 4 — фильтр-сетка; 5 — верхний подшипник электродвигателя; 6 — обмотка статора; 7 — водонепроницаемый цилиндр; 8 — корпус электродвигателя; 9 — ротор; 10 — пластинки статора; 11 — упорный подшипник

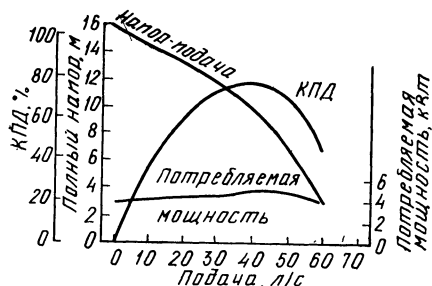
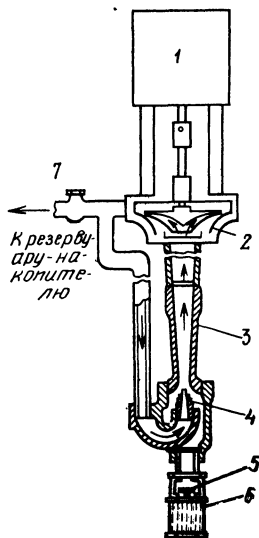


Рис. 11.14. Характеристики одной ступени погружного турбонасоса

Рис. 11.15. Струйный насос:

1 — электродвигатель; 2 — рабочее колесо центробежного насоса; 3 — сопло; 4 — эжектор; 5 — клапан с педальным управлением; 6 — фильтр-сетка; 7 — предохранительный клапан



и подводит ее на вход второй ступени, вторая ступень подает воду на вход третьей ступени и т. д. Последний насос этой машины соединен с напорным трубопроводом, выходящим из скважины наружу. Многоступенчатые насосы обеспечивают любой требуемый напор, так как общий напор машины равен сумме напоров всех ступеней. Давление в каждой ступени возрастает примерно на одинаковую величину при условии, что конструкция ступеней одинакова. Следовательно, полный перепад давления машины зависит от конструкции и числа ступеней. Таким образом, если развиваемый напор необходимо повысить, достаточно увеличить число ступеней и поставить более мощный электродвигатель.

Каждая ступень погружного турбонасоса подает воду на вход следующей ступени. Поскольку все ступени собраны по вертикали одна над другой, направление движения воды должно несколько раз измениться. Потери, вызванные трением и вихреобразованием между ступенями, обусловлены конструкцией и массовым расходом. Даже самая лучшая конструкция не может дать на выходе машины, состоящей из серии насосов одинаковой конструкции, напор, равный сумме напоров всех ступеней.

Как видно на рис. 11.14, характеристика одной ступени погружного турбонасоса весьма сходна с характеристикой одноступенчатого центробежного насоса. По рабочим характеристикам одной ступени можно получить характеристики многоступенчатой машины. Для этого, после того как будут построены кривые для одной ступени, проводят корректировку кривой КПД в зависимости от количества ступеней и потребляемой мощности. У каждой фирмы — производителя насосов свой метод обработки характеристических кривых.

Струйные насосы. Струйный насос представляет собой комбинацию центробежного насоса и эжектора (рис. 11.15). За выход-

ным патрубком центробежного насоса вода разделяется на два потока, основной поток поступает в резервуар-накопитель, а вспомогательный рециркулирует через эжектор. В эжекторе из-за сужения проточного канала скорость течения жидкости возрастает. Согласно уравнению Бернулли с увеличением скорости статическое давление жидкости в эжекторе уменьшается. Таким образом, на выходе из эжектора создается перепад давления, достаточный для того, чтобы вода из скважины устремлялась в сопло струйного насоса (см. рис. 11.15). Рециркулирующий поток и поток из скважины сливаются в один общий поток, который возвращается в насос.

Нормальная работа эжектора обеспечивается редукционным клапаном, который поддерживает необходимое и достаточное давление в рециркуляционном контуре. Повышение давления в эжекторе, вызывает увеличение частичного разрежения и, следовательно, потока из скважины. Для увеличения давления в эжекторе можно применять центробежный насос какой-либо иной конструкции или многоступенчатый насос.

Струйные насосы, как правило, применяются при высоте всасывания 7,6 м или более. При меньших значениях этого параметра необходимое разрежение может быть достигнуто стандартным центробежным насосом. Обеспечивая подачу от 40 л/с и высоту нагнетания до 46 м, струйные насосы характеризуются сравнительно небольшими размерами (Ground Water and Wells, 1966). Струйные насосы можно применять для узких скважин (диаметром до 5 см). Все движущиеся части насоса находятся на поверхности, что облегчает техническое обслуживание и ремонт. При необходимости движущиеся части могут быть установлены на некотором расстоянии от скважины. Струйные насосы не требуют значительных капитальных и эксплуатационных расходов. К основным недостаткам этих насосов относятся: ограниченная высота нагнетания и невысокая производительность, а также довольно низкий КПД.

Струйные насосы применяются главным образом в относительно узких скважинах. В частности, они весьма удобны в бытовых системах водоснабжения.

Диагональные насосы. В диагональных насосах для сообщения жидкости энергии используется помимо центробежных сил подъемный эффект осевого насоса (который рассмотрен ниже). В некоторых случаях целесообразно применять в погружных турбонасосах лопастные колеса с косым потоком (рис. 11.16). Эта конструкция — своего рода компромисс между рабочим колесом центробежного насоса (см. рис. 11.6—11.8) и рабочим колесом осевого насоса (см. рис. 11.17).

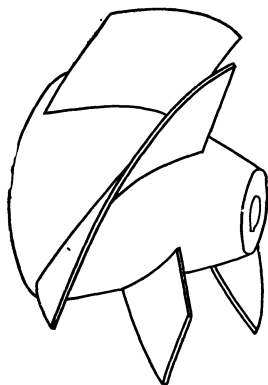


Рис. 11.16. Диагональный центробежный насос

РОТАЦИОННЫЕ НАСОСЫ

В корпусе ротационного насоса расположен вращающийся элемент (или элементы), который перекачивает жидкость со стороны низкого давления на сторону высокого давления. За исключением осевых насосов и регенеративных турбонасосов, также входящих в эту группу, ротационные насосы можно отнести к так называемым объемным машинам (т. е. производительность насоса и частота вращения рабочего колеса связаны линейной зависимостью).

Осевые насосы. Простейший осевой насос состоит из рабочего колеса, выполненного в виде гребного винта, помещенного внутри трубы, и электродвигателя, который приводит во вращение рабочее колесо (рис. 11.17). Поскольку перемещение жидкости в этой машине осуществляется механическим путем, т. е. при каждом повороте гребного винта столб жидкости поднимается на величину шага (минус скольжение), упорный подшипник должен полностью поглощать ускоряющую силу, создаваемую рабочим органом.

Наиболее подходящим эксплуатационным режимом для осевого насоса является сочетание небольшого напора с высокой производительностью. Типичные для стандартного осевого насоса рабочие характеристики приведены на рис. 11.18. Кривые напор — производительность и КПД выглядят более пологими, чем аналогичные кривые для центробежного насоса. Как видно из графика, с увеличением напора и уменьшением подачи потребляемая мощность растет, поэтому для насосов этого типа не рекомендуется применять дросселирование, чтобы уменьшить подачу. Развиваемый одноступенчатыми осевыми насосами напор не превышает 7—8 м. Высокonaпорные машины целесообразно выполнять многоступенчатыми, что позволяет увеличить напор до 40 м. Характерной особенностью насосов этого типа является высокая производительность (до нескольких тысяч кубометров в минуту).

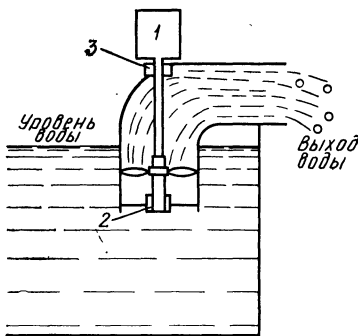


Рис. 11.17. Осевой насос:

1 — электродвигатель; 2 — упорный подшипник; 3 — верхний подшипник

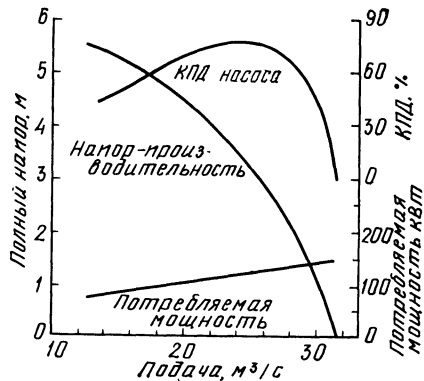


Рис. 11.18. Характеристики осевого насоса

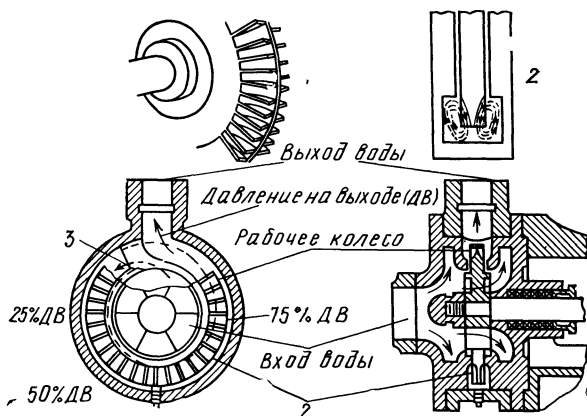


Рис. 11.19. Регенеративный турбонасос; показаны также узлы насоса и направление циркуляции воды (Henderson and Perry, 1955):

1 — ротор; 2 — канал; 3 — окно всасывания

Максимальная частота вращения рабочего колеса определяется из условия отсутствия кавитации в зоне кромок винта. Линейная скорость этих кромок при данной частоте вращения прямо пропорциональна диаметру рабочего колеса, поэтому, увеличивая диаметр рабочего колеса, необходимо уменьшать частоту вращения, которая для больших насосов обычно не превышает 100—300 об/мин. Такая частота вращения недостаточна для непосредственного соединения с электродвигателем.

Регенеративные турбонасосы *. Насос, описанный ниже, получил здесь такое название, чтобы его можно было отличить от погружного турбонасоса. В регенеративном турбонасосе (рис. 11.19) рабочее колесо представляет собой плоский диск, в который с двух сторон врезаны пластины. При вращении ротора пластины пробегают по кольцевому каналу в корпусе насоса. После всасывающего патрубка вода разделяется на два потока, поступающие на обе стороны ротора. Жидкость циркулирует между пластинами и в каналах ротора в радиальном направлении. Каждый раз, когда вода сталкивается с очередной пластиной, она получает дополнительную энергию. Кроме того, вода перегоняется пластинами по периферии рабочего колеса к выходному отверстию насоса. Характер течения жидкости в рабочем колесе обуславливает постепенное нарастание давления по мере перемещения жидкости от входного к выходному патрубку насоса.

Регенеративные турбонасосы не относятся к центробежным, поскольку возникающие в них центробежные силы не являются основным источником энергии рабочего тела. Тем не менее характеристики регенеративных турбонасосов сходны с характеристиками центробежных, а центробежная сила действительно способствует циркуляции в радиальной плоскости. На рис. 11.20 изображены рабочие характеристики регенеративного турбонасоса. Как видно из рисунка, кривая КПД регенеративного насоса весьма сходна с

* В СССР их называют вихревыми насосами. — Прим. ред.

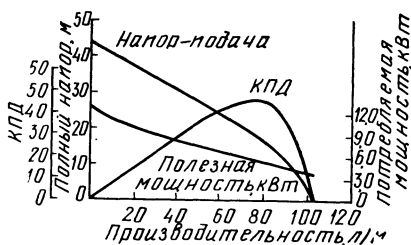


Рис. 11.20. Характеристики регенеративного турбонасоса

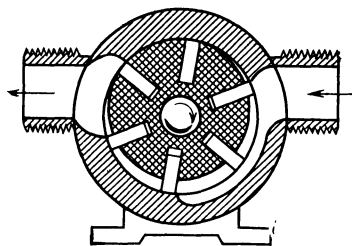


Рис. 11.21. Пластинчатый насос

кривой КПД центробежного насоса. Напорные характеристики регенеративного и центробежного насосов несколько различаются. В области низких подач напорная характеристика центробежного насоса выглядит почти горизонтальной, в то время как для регенеративного насоса типичен крутой наклон этой кривой, причем такая тенденция сохраняется при всех значениях подачи. Характерной особенностью регенеративного турбонасоса является увеличение потребляемой мощности при уменьшении подачи, а для центробежных насосов уменьшение подачи, как правило, не ведет к увеличению потребляемой мощности. Последнее обстоятельство имеет большое значение при регулировании подачи регенеративных турбонасосов путем дросселирования: если электродвигатель не имеет запаса по мощности, применение дросселирования как способа регулирования подачи недопустимо.

Многоступенчатые регенеративные турбонасосы получили широкое распространение. При большом числе ступеней такие многоступенчатые насосы могут развивать напор до 760 м и обеспечивать подачу до 12,6 л/с и больше (Holland and Chapman, 1966). Крупные установки обычно характеризуются более низким КПД, чем центробежные насосы, однако регенеративные турбонасосы небольших размеров с подачей менее 2,2 л/с имеют КПД такого же порядка, как и центробежные насосы соответствующей производительности, и даже выше. В системах водоснабжения, не требующих слишком высоких напоров и предназначенных для перекачивания сравнительно небольших объемов воды, широко применяются регенеративные турбонасосы, поскольку отдельно взятая ступень регенеративного турбонасоса развивает более высокий напор, чем отдельно взятая ступень центробежного насоса.

Пластинчатые насосы. Это ротационные машины, принцип действия которых основан на изменении объема рабочей камеры. Хотя они и применяются для подачи воды, как правило, их используют для создания давления в масляном гидроприводе. Основным узлом пластинчатого насоса является ротор с радиальными прорезями (рис. 11.21), в которых свободно перемещаются пластины. Прижатие пластин к внутренней цилиндрической поверхности ротора обеспечивается либо пружинами, которые размещают под пластинами, либо жидкостью, специально подводимой к пластинам

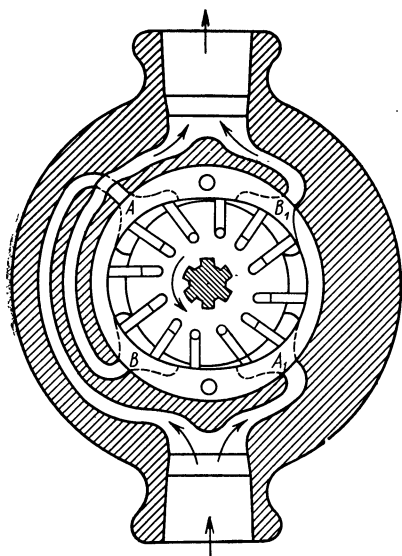


Рис. 11.22. Пластинчатый насос. Модификация с уравновешенными гидродинамическими силами

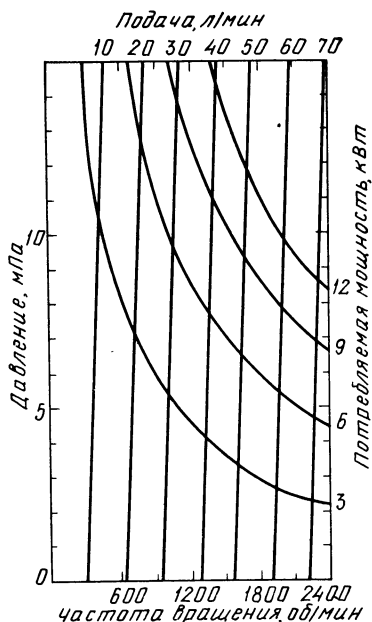


Рис. 11.23. Характеристики пластинчатого насоса

из напорной линии насоса, а также под действием центробежных сил. Поскольку ротор расположен в корпусе эксцентрично, объем камеры, образованной двумя соседними пластинами, наружной поверхностью ротора и внутренней поверхностью корпуса, изменяется на всем протяжении от входа в насос до выходного патрубка. На всасывающей стороне насоса камера расширяется, за счет этого расширения жидкость засасывается в насос. Выходной участок рабочей камеры имеет сужение, здесь жидкость сжимается до выхода через выпускной патрубок насоса. За время протекания жидкости через камеру с переменным объемом ее давление постепенно возрастает.

Несущие подшипники вала (см. рис. 11.21) должны испытывать неравномерную нагрузку, так как силы давления жидкости на ротор во время работы насоса постоянно изменяются. Наличие двух симметрично расположенных рабочих камер по обе стороны ротора выравнивает нагрузку на подшипники. При этом с каждой стороны вращающегося ротора (рис. 11.22) находится жидкость с высоким давлением на выходе из насоса (B и B_1) и жидкость с низким давлением на входе в насос (A и A_1). Таким образом, гидродинамические силы, действующие на подшипники, уравновешены.

На рис. 11.23 приведены основные рабочие характеристики пластинчатого насоса. В насосах этого типа подача почти не зависит

от напора, так как давление жидкости увеличивается в результате изменения объема рабочей камеры. Незначительная изогнутость кривых напор — подача объясняется влиянием скольжения. Зазоры между краями пластин и стенкой корпуса очень малы. Однако небольшая утечка воды все же происходит. Просачивание жидкости в этой зоне, а также другие возможные утечки со стороны высокого давления на сторону низкого давления насоса ведут к потере напора — процесс, известный как скольжение насоса. По мере изнашивания внутренних частей насоса скольжение увеличивается.

Для объемных насосов вводится специальная величина — объемный КПД.

$$\text{Объемный КПД} = \frac{\text{действительный объем подачи за один цикл}}{\text{объем рабочей камеры насоса}}. \quad (11.19)$$

Таким образом, объемный КПД определяется как отношение действительного объема жидкости, поданного насосом в напорную линию за один цикл, к теоретически возможному. Это поясняет, почему у насосов с большим скольжением объемный КПД значительно снижается. Увеличение гидростатического давления должно вызвать пропорциональное увеличение скольжения и уменьшение объемного КПД. При прочих равных условиях на объемный КПД существенно влияет вязкость жидкости. Насосы, работающие с более вязкой жидкостью, характеризуются меньшим скольжением. Поскольку вязкость жидкости зависит от ее температуры, изменение температуры рабочего тела отражается на объемном КПД насоса. Вязкость жидкости, частота вращения колеса и объемный КПД также взаимосвязаны, поскольку жидкости, обладающие высокой вязкостью, хуже заполняют камеры насоса, чем менее вязкие, особенно при высокой частоте вращения.

Пластинчатые насосы обладают некоторыми преимуществами по сравнению с другими типами насосов. Они самозаливающиеся и характеризуются незначительной пульсацией за насосом и относительно постоянным расходом при определенной частоте вращения. Износ пластин самокомпенсируется за счет радиального перемещения в прорезях ротора. Таким образом, пластины могут долгое время работать без замены, если направление вращения ротора остается неизменным. Эти легкие и компактные машины отличаются высоким объемным КПД и могут работать в воде, содержащей примеси газов. Хотя эти машины относятся к классу объемных, они допускают регулирование подачи изменением частоты вращения и (в некоторых моделях) регулированием величины эксцентриситета ротора.

В то же время пластинчатые насосы предъявляют определенные требования к жидкости. В частности, в ней не должны содержаться абразивные вещества и слишком много механических примесей. В конструкции обязательно должен быть предусмотрен предохранительный клапан на случай, если насос окажется вклю-

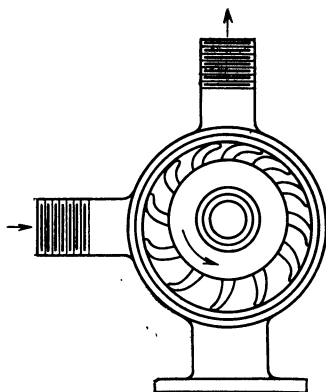


Рис. 11.24. Пластина́тный насос с упругими пластинами

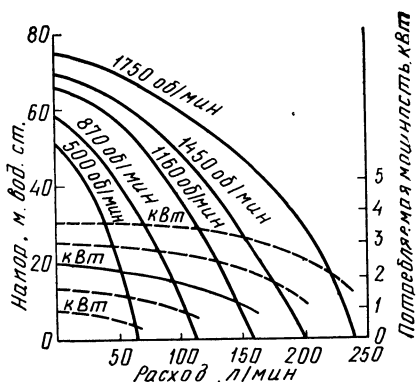


Рис. 11.25. Характеристики пластина́тного насоса с упругими пластинами

ченным при закрытой напорной задвижке, что вызовет поломку насоса или электродвигателя.

Промышленность выпускает много типоразмеров пластинчатых насосов с подачей до нескольких тысяч литров в минуту и давлениями до 15000 кПа. Предельная вязкость жидкости для насосов этого типа составляет приблизительно 0,11 м²/с.

Пластинчатые насосы с гибкими пластинами. Отличительной особенностью этих насосов является то, что пластины выполнены из упругого материала. В отличие от скользящих пластин, свободно перемещающихся в прорезях ротора в радиальной плоскости, при работе насоса эластичные пластины изгибаются, плотно прижимаясь к внутренней поверхности корпуса, и таким образом плавно изменяют объем, заключенный между соседними пластинами (рис. 11.24). Рабочие характеристики насоса с гибкими пластинами показаны на рис. 11.25.

Эти насосы просты по конструкции, имеют небольшой вес, компактны, легко собираются и разбираются. Замена быстро изнашивающегося ротора обходится сравнительно недорого и не вызывает особых технических трудностей. Пластинчатые насосы этой конструкции также относятся к самозаливающимся машинам и характеризуются незначительной пульсацией жидкости за насосом. Отличительной особенностью этих машин является то, что они могут непродолжительное время работать при закрытой напорной задвижке, что, как правило, для объемных машин исключается.

Обычно насосы с гибкими пластинами выпускаются небольших размеров и предназначены для обслуживания систем с расходами до 400—500 л/мин и давлениями до 200 кПа. Выпускаются также машины, рассчитанные на более высокое давление — до 400 кПа.

Шестеренные насосы. Существует два основных типа шестеренных насосов: с наружным и внутренним зацеплением шестерен. Насосы первой группы характеризуются минимальным зазором

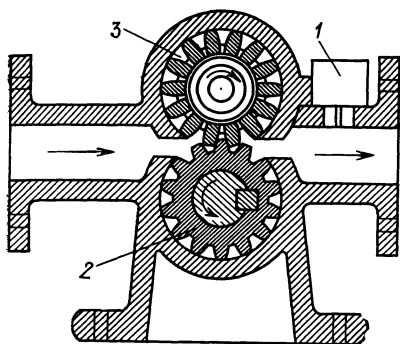


Рис. 11.26. Шестеренный насос с наружным зацеплением шестерен:

1 — предохранительный клапан; 2 — ведущая шестерня; 3 — ведомая шестерня

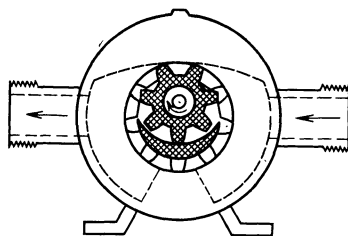


Рис. 11.27. Шестеренный насос с внутренним зацеплением шестерен

между зубьями шестерен и внутренними поверхностями корпуса, а также между зубьями шестерен в зацеплении. Вода через всасывающий патрубок насоса (рис. 11.26) поступает порциями в пространство между зубьями шестерен и внутренней поверхностью корпуса. Вращающиеся шестерни переносят ее на сторону высокого давления. На участке перед входом зубьев в зацепление происходит выдавливание воды в напорную линию. На рис. 11.26 показан насос с прямозубыми цилиндрическими шестернями. Другой вариант исполнения этой модели — насосы с косозубыми или шевронными шестернями. Высокоскоростные насосы, как правило, выпускаются с косозубыми шестернями.

Принцип действия насосов второго типа — с внутренним зацеплением шестерен (рис. 11.27) — такой же, как и у насоса с наружным зацеплением шестерен, но у этих насосов один ротор выполнен в виде шестерни с наружным зацеплением, другой — в виде шестерни с внутренним зацеплением. Серповидный вкладыш плотно вставлен в зазор между шестернями и препятствует проходу через проточную часть насоса. При работе насоса вода поступает к напорному патрубку фактически по двум каналам, образованным зубьями шестерни с наружным зацеплением и прилегающей к ним внутренней поверхностью вкладыша (первый канал) и зубьями шестерни с внутренним зацеплением и наружной поверхностью вкладыша (второй канал). Около выходного патрубка зубья шестерен входят в зацепление и выбрасывают жидкость под давлением в напорную линию.

Рабочие характеристики шестеренного насоса приведены на рис. 11.28. С увеличением напора подача, как видно из кривой напор — подача, несколько уменьшается, что объясняется влиянием скольжения насоса, которое увеличивается пропорционально росту давления. Кривая зависимости подводимой мощности от напора приближается к кривой второго порядка в относительно широком диапазоне параметров. При более высоких значениях напора потребляемая мощность возрастает значительно быстрее, чем при низ-

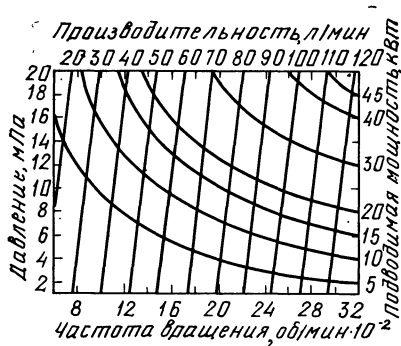


Рис. 11.28. Характеристики шестеренного насоса с цилиндрическими прямыми зубьями

ких. Это обстоятельство следует иметь в виду при выборе шестеренного насоса, так как регулирование напора в системе не должно сопровождаться резкими скачками потребляемой мощности.

Шестеренные насосы как с наружным, так и внутренним зацеплением относятся к самозаливающимся машинам и характеризуются (если не учитывать влияние скольжения) почти постоянным объемом подачи независимо от давления. Пульсация давления жидкости за насосом настолько незначительна, что необходимость в контрольных клапанах отпадает. Эти компактные, легкие и недорогие машины обладают высоким объемным КПД. Кроме того, в насосах с внутренним зацеплением шестерен движущиеся части соприкасаются между собой на небольшом участке, что уменьшает износ и потери на трение и вихреобразование. Последнее обстоятельство очень важно, так как позволяет изготавливать отдельные детали насоса из материалов с низкими допускаемыми напряжениями сдвига.

Основной недостаток шестеренных насосов связан с особенностью их конструкции, предусматривающей жесткие допуски на зазоры между движущимися элементами. Из-за этого насосы могут работать только с чистыми жидкостями, не содержащими механических примесей. Поскольку смазка движущихся частей осуществляется самой перекачиваемой жидкостью, работа насоса всухую не допускается. На случай непредвиденного выхода из строя напорного трубопровода предусмотрены предохранительные клапаны для отключения насоса и привода.

Основной недостаток шестеренных насосов связан с особенностью их конструкции, предусматривающей жесткие допуски на зазоры между движущимися элементами. Из-за этого насосы могут работать только с чистыми жидкостями, не содержащими механических примесей. Поскольку смазка движущихся частей осуществляется самой перекачиваемой жидкостью, работа насоса всухую не допускается. На случай непредвиденного выхода из строя напорного трубопровода предусмотрены предохранительные клапаны для отключения насоса и привода.

Шестеренные насосы с прямыми зубьями цилиндрическими шестернями как самые простые в изготовлении и дешевые находят широкое применение. Однако у насосов с высокой подачей (свыше 800—900 л/мин) нагрузка на подшипники и шум становятся слишком большими. Работа высокоскоростных машин характеризуется значительным уровнем шума. Для машин больших размеров целесообразно применение шевронных и косозубых шестерен. Механический КПД порядка 90% является обычным для шестеренных насосов. Шестеренные насосы с шевронными шестернями могут работать с высоковязкими жидкостями (вязкость примерно 1,1 м²/с).

Шестеренные насосы работают с водой, но, по всей вероятности, более широкое применение они могут найти как масляные насосы. Масло обеспечивает лучшее качество смазки, в то же время, работая в качестве масляного насоса, шестеренный насос должен развивать давление не менее 20000 кПа. Шестеренные насо-

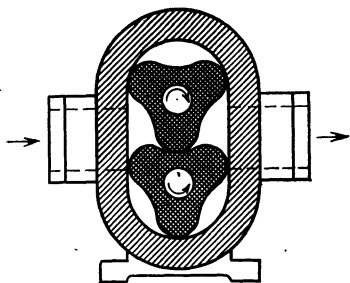


Рис. 11.29. Кулачковый насос

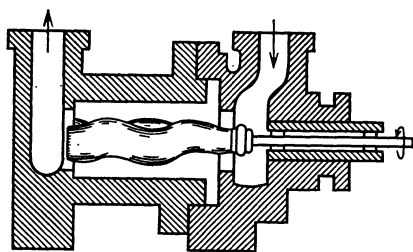


Рис. 11.30. Винтовой насос с одним винтом

сы, как правило, изготавливаются из металла, поэтому их редко применяют для работы с соленой водой. Шестерни и корпус можно изготавливать из пластмассы, такой вариант исполнения позволит использовать насосы для подачи соленой воды, однако в этом случае скорее наступит износ и насос не сможет развивать высокие давления.

Кулачковые насосы. Хотя эти насосы и предназначены для работы с водой, они сравнительно редко применяются на предприятиях по разведению водных организмов. Принципиальная схема насоса показана на рис. 11.29. При повороте кулачков жидкость поступает в проточную часть насоса, форма которой определяется профилем кулачков и внутренней поверхностью корпуса, и перемещается в ней со стороны низкого давления на сторону высокого давления. Кулачки, входя в зацепление, выдавливают жидкость в напорную линию.

Рабочие характеристики кулачковых насосов весьма сходны с рабочими характеристиками шестеренных насосов, то же самое относится к их преимуществам и недостаткам. Кулачковые насосы часто применяются для работы с материалами, обладающими высокой вязкостью, например с тестом и другими пищевыми продуктами.

Винтовые насосы. Основным механизмом насоса является винт (или винты), выточенный с определенным шагом и вращающийся внутри корпуса. Вращение винта заставляет жидкость перемещаться вдоль него со стороны низкого давления на сторону высокого давления. На рис. 11.30 показана принципиальная схема такого насоса с одним винтом, который заключен в чехол из эластичного материала. В трехвинтовом (рис. 11.31) насосе винты сцеплены. Поскольку винтовые насосы относятся к объемным машинам, подача зависит в первую очередь от частоты вращения и собственно конструкции насоса. Однако, как видно из рабочих характеристик винтового насоса (рис. 11.32), с увеличением давления подача изменяется значительно больше, чем в объемных машинах других типов, главным образом в результате внутреннего скольжения.

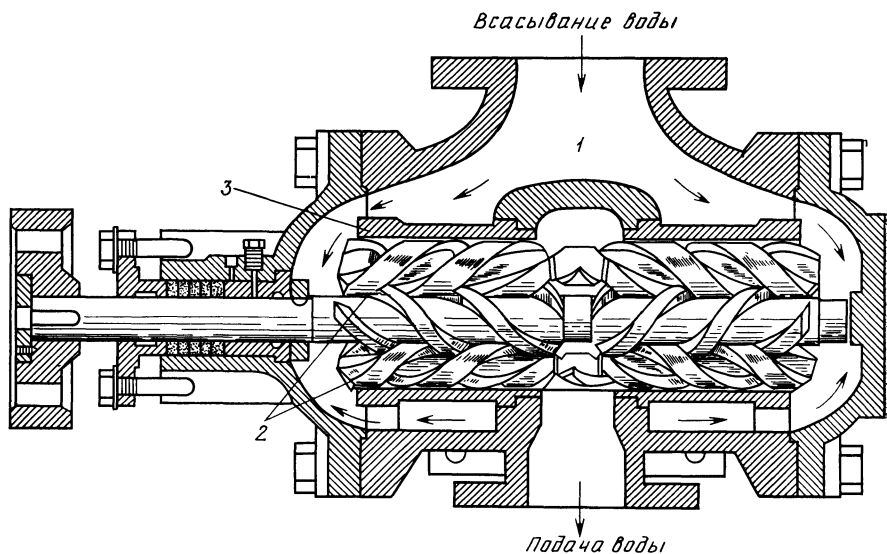


Рис. 11.31. Винтовой насос с тремя винтами (одним ведущим и двумя ведомыми):

1 — ведущий ротор; 2 — ведомые роторы; 3 — кожух ротора

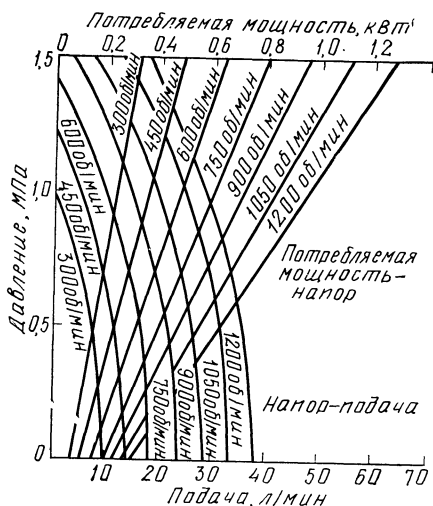


Рис. 11.32. Характеристики винтового насоса

Винтовые насосы обычно получаются громоздкими и тяжелыми. К недостаткам этих насосов относится также значительное влияние вязкости рабочего тела на подачу. Однако ряд преимуществ по сравнению с другими типами объемных машин делает эти насосы в некоторых случаях незаменимыми. Наиболее специфичной и выгодной особенностью этого насоса является возможность работать с растворами, содержащими механические примеси. Следовательно, их можно применять для откачивания воды из систем, предназначенных для культивирования водных организмов. Винтовые насосы могут длительное время работать без ремонта, так как износ рабочих частей незначителен; они относятся к самоза-

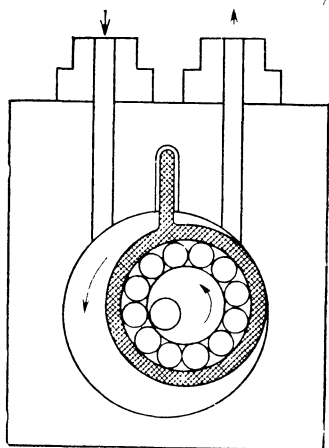


Рис. 11.33. Перистальтический насос. Камера выполнена из упругого материала, ротор расположен эксцентрично

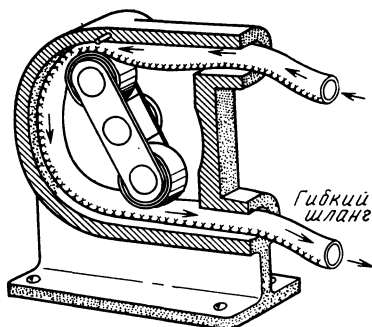


Рис. 11. 34. Насос с гибким шлангом

ливающимся машинам и отличаются постоянством подачи и крайне незначительной пульсацией давления на выходе из насоса. При установке винтового насоса, так же как и при установке любого насоса объемного типа, должен быть обязательно предусмотрен предохранительный клапан на случай непредвиденного перекрытия напорной задвижки.

Насосы с гибким шлангом. Насос с гибким шлангом, или перистальтический насос, состоит из гибкого шланга, по которому продвигается перекачиваемая жидкость, и вращающегося устройства, пережимающего шланг. На рис. 11.33 и 11.34 приведены две конструкции такого насоса. Ротор, поворачиваясь, зажимает шланг, отсекая определенный объем жидкости, который он при дальнейшем вращении гонит на сторону высокого давления.

Насосы с гибким шлангом довольно редко применяются на предприятиях по разведению водных организмов, так как они работают в области низких подач. Исключение могут составлять лабораторные насосы. Обычно насосы этого вида работают в качестве дозирующих, предназначенных для введения коррозионно-активных жидкостей, например раствора хлора, в основной поток воды. Отличительной особенностью этого насоса является точная регулировка массового расхода. Такие насосы можно рекомендовать для работы с коррозионными жидкостями, так как в проточной части насоса жидкость соприкасается только с резиновым или пластмассовым шлангом, не подверженным коррозии.

Насосы этого типа относятся к низконапорным, так как ожидаемое давление на выходе зависит от прочности гибкого шланга. Срок службы насоса также ограничен долговечностью шланга, однако его можно увеличить периодической заменой шланга.

НАСОСЫ С ВОЗВРАТНО-ПОСТУПАТЕЛЬНЫМ ДВИЖЕНИЕМ ПОРШНЯ

Поршневые насосы. Поршневой насос состоит из плотно пригнанного поршня (поршней), совершающего возвратно-поступательное движение внутри цилиндра (цилиндров), и системы впускных и выпускных клапанов для перепуска жидкости. На рис. 11.35 показан принцип действия однопоршневого насоса. На рис. 11.35, а показан момент, когда плунжер (поршень) находится вблизи своего крайнего положения. Как только поршень начинает двигаться вниз, нижний запорный клапан закрывается, отсекая столб жидкости, находящийся над клапаном. Плунжер продолжает движение вниз, в результате чего под ним возрастает давление, которое заставляет открыться верхний запорный клапан, перепускающий жидкость из объема под плунжером в объем над ним. На рис. 11.35, б показано положение клапанов при ходе плунжера вверх. Как только плунжер начинает двигаться вверх, верхний запорный клапан закрывается. Находящийся над плунжером столб жидкости поднимается и выталкивается наружу. В то же время при ходе плунжера вверх давление под ним уменьшается, в результате чего открывается нижний запорный клапан. Вода через всасывающий патрубок устремляется в рабочую камеру насоса. Как только плунжер достигнет своего верхнего положения, подача воды прекращается, нижний запорный клапан закрывается, а верхний — открывается, цикл повторяется.

Все поршневые насосы работают по описанному выше принципу, однако существует много различных конструкций. На рис. 11.35 показан поршневой насос простого действия с прерывистой подачей: насос подает воду только во время хода поршня вверх, что соответствует половине цикла его работы. Насос двойного действия оснащен более сложной системой клапанов, обеспечивающих подачу воды в течение всего цикла. В некоторых случаях целесообразно применять сдвоенные насосы, т. е. насосы с двумя поршнями, или многопоршневые насосы. Выпускаются многопоршневые насосы как простого, так и двойного действия, рассчитанные на подачу до нескольких тысяч литров воды в минуту.

Поршневые насосы можно считать самозаливающимися машинами при условии, что поршень точно притерт к стенкам цилиндра, а запорные клапаны не подтекают. Расчетная высота всасывания поршневого насоса, изобретенного на рис. 11.25, равна 10,3 м. Практически она не превышает 7—8 м. Поршневые насо-

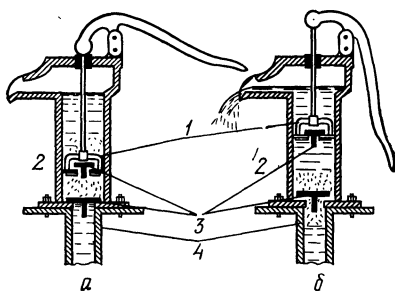


Рис. 11.35. Принцип действия поршневого насоса:

а — плунжер в нижнем положении;
б — плунжер в верхнем положении;
1 — плунжер; 2 — цилиндр; 3 — пере-
пускной клапан; 4 — всасывающая
труба

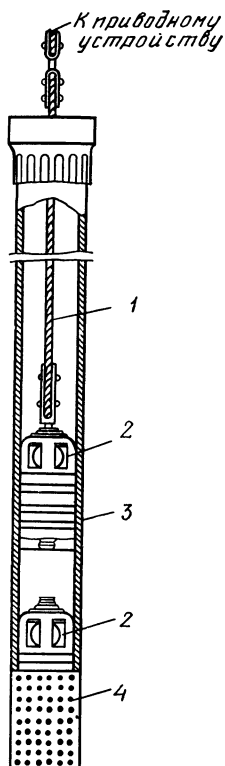


Рис. 11.36. Погружной поршневой насос простого действия:
1 — тяга; 2 — контрольный шаровой клапан; 3 — уплотнение из кожи на плунжере; 4 — фильтр-сетка

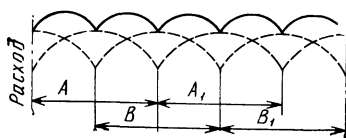


Рис. 11.37. График изменения подачи двойного поршневого насоса двойного действия

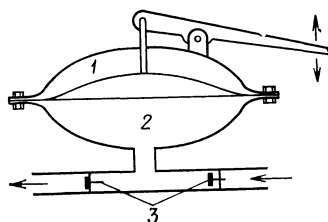


Рис. 11.38. Диафрагменный насос:
1 — диафрагма; 2 — полость насоса; 3 — перепускные клапаны

сы с успехом могут применяться для выкачивания воды из глубоких скважин, при этом поршень должен работать почти на самом дне скважины. В этом случае высота подъема воды будет зависеть как от мощности привода, так и от прочности на разрыв конструктивного элемента, связывающего поршень и привод (шток насоса). На рис. 11.36 изображен поршневой погружной насос. Промышленность выпускает поршневые насосы для откачивания воды из скважин глубиной несколько сотен метров, однако они сравнительно редко применяются для этой цели, так как уступают по производительности погружным турбонасосам и поршневым насосам простого действия, которые подают воду в напорную линию только в течение половины рабочего цикла. Как правило, погружные насосы применяются для работы в узких скважинах диаметром менее 10 см.

Поршневые насосы относятся к объемным машинам, поэтому в системе обязательно должен быть предусмотрен предохранительный клапан или другое защитное устройство на случай непредвиденного перекрытия запорной задвижки. Контрольные клапаны часто требуют дополнительного технического обслуживания. Поршни водяных поршневых насосов обязательно снабжаются

кольцевыми уплотнениями из кожи, резины или других подобных материалов. Кольца постепенно изнашиваются и их необходимо периодически, хотя и довольно редко, заменять. Регулирование подачи у насосов этого типа осуществляется изменением длины хода поршня (в некоторых моделях) или изменением числа ходов поршня в минуту (во всех моделях).

Основной недостаток поршневого насоса связан с пульсирующим характером подачи. На рис. 11.37 показан график изменения подачи во времени (или по циклам) для сдвоенного (двухпоршневого) насоса двойного действия. Пунктирными линиями показана подача от каждого поршня отдельно, причем цикл работы одного поршня смещен во времени по отношению к циклу работы другого поршня на время, равное половине цикла. Расстояние A на графике соответствует первой половине цикла работы первого поршня, A_1 — второй половине цикла работы этого же поршня. Аналогично отрезки B и B_1 соответствуют одному циклу второго поршня. Сплошной линией показана результирующая подача всей системы*. Для уменьшения пульсации большое значение имеет правильный выбор длины хода поршней. Насосы с большим числом поршней работают значительно равномернее, если правильно подобрана длина хода поршней. Самая большая пульсация подачи наблюдается у насосов простого действия или однопоршневых.

Поршневые насосы, как правило, тяжелы и громоздки, но они отличаются исключительной долговечностью при условии грамотного технического обслуживания. Максимальное давление, развиваемое поршневым насосом, достигает 300000 кПа.

Диафрагменные насосы. Диафрагменный насос состоит из корпуса, диафрагмы, механизма, заставляющего диафрагму прогибаться, и двух перепускных клапанов (рис. 11.38). Когда эластичная диафрагма поднимается, жидкость затягивается в рабочую полость насоса (под диафрагмой) за счет частичного разрежения, возникающего в полости при увеличении ее объема. Одновременно под действием этого же разрежения закрывается выходной клапан, тем самым предупреждается перетекание жидкости из напорной линии обратно в рабочую полость насоса. Как только диафрагма начинает опускаться, давление в рабочей полости насоса увеличивается, и входной клапан закрывается. При дальнейшем ходе диафрагмы вниз давление в рабочей полости продолжает расти и увеличивается до тех пор, пока не превысит давление в напорной линии и не откроет выходной клапан, перепускающий жидкость из проточной части насоса в напорную линию. При последующем прогибании диафрагмы цикл повторяется.

* На графике замечено следующее несоответствие: если A и A_1 — один цикл работы первого поршня, а B и B_1 — один цикл работы второго поршня, то смещение циклов работы двух поршней по этим кривым составляет четверть цикла, а не половину; если принять, что смещение циклов работы двух поршней составляет полцикла, то A и A_1 должны соответствовать двум последовательным циклам первого поршня, а B и B_1 — двум последовательным циклам второго поршня. — *Прим. перев.*

Подача диафрагменного насоса носит пульсирующий характер, однако, так же как и в поршневом насосе, путем увеличения числа рабочих органов и правильного временного согласования их работы можно добиться того, чтобы пульсация была минимальной. Кроме того, на выходе диафрагменного насоса можно поставить аккумулирующее устройство, выравнивающее подачу.

Для привода диафрагменного насоса можно использовать механические, пневматические или гидравлические устройства. Простейший механический привод показан на рис. 11.38. Широкое распространение получила конструкция привода, в основу которого положен кулачковый механизм. Многоцилиндровые диафрагменные насосы часто выполняются с таким приводом. При использовании пневмопривода необходимо устройство для подачи сжатого воздуха, производительность которого должна соответствовать производительности насоса, а давление сжатого воздуха должно превышать расчетное давление на выходе насоса. Если в схеме пневмопривода предусмотрен гидроусилитель, давление сжатого воздуха может быть ниже давления жидкости на выходе из насоса. В конструкции с пневмоприводом обязательно устройство дополнительной системы пневмоклапанов, обеспечивающих периодическое изменение давления в полости насоса над диафрагмой. Из-за сжимаемости воздуха насосы с пневмоприводом менее эффективны при высоких давлениях по сравнению с насосами с гидравлическим приводом. Насосы с гидроприводом, работающим на масле или воде, достаточно надежны, но сравнительно инерционны, что объясняется гидравлическими потерями в системе привода, влиянием вязкости рабочей жидкости и другими факторами.

Большинство диафрагменных насосов относится к самозаливающимся. подача регулируется изменением частоты хода диафрагмы и в некоторых моделях изменением величины хода диафрагмы. Диафрагма фактически является единственным элементом насоса, непосредственно соприкасающимся с жидкостью. Последнее обстоятельство чрезвычайно важно, поскольку позволяет использовать насос при работе с коррозионно-активными жидкостями, например с соленой водой. Диафрагменные насосы не предъявляют особых требований к чистоте перекачиваемой жидкости, которая может содержать значительное количество механических примесей при условии, что они беспрепятственно проходят через перепускные клапаны системы. Диафрагменные насосы, хотя и относятся к объемным машинам, не выходят из строя в случае непредвиденного перекрытия напорной задвижки, если они работают от гидро- или пневмопривода, поскольку в этих системах всегда имеются специальные защитные устройства. Естественно, это не относится к насосам с механическим приводом, которые ни в коем случае не должны оставаться включенными при перекрытии напорной линии. Допускается работа диафрагменных насосов всухую, это не вызывает никаких повреждений.

Обычно диафрагменные насосы получаются довольно громоздкими и тяжелыми по сравнению с другими насосами с аналогич-

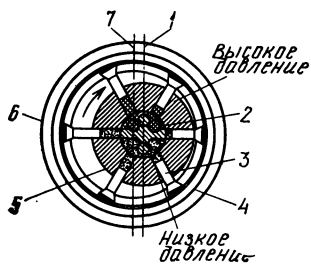


Рис. 11.39. Роторный поршневой насос:

1 — ось цилиндрического блока; 2 — ось; 3 — поршни; 4 — ротор; 5 — цилиндрический блок; 6 — корпус; 7 — ось ротора

ными напорными характеристиками. Выпускаемые диафрагменные насосы обладают широким диапазоном подачи: от 0,05 до 400 л/мин. Максимальное расчетное давление, развиваемое этими насосами, превышает 24 000 кПа.

Роторные поршневые насосы. Эти насосы предназначены в первую очередь для работы в масляных гидросистемах, и лишь некоторые их модификации могут работать с водой. Роторный поршневой насос (рис. 11.39) состоит из неподвижно закрепленной оси и нескольких поршней, размещенных в цилиндрическом блоке, который установлен эксцентрично по отношению к ротору.

Цилиндрический блок вращается вместе с ротором, причем поршни прижимаются своими торцами к внутренней поверхности ротора давлением жидкости и(или) центробежной силой. Ось ротора смещена относительно оси цилиндрического блока. При вращении цилиндрического блока и ротора поршни совершают возвратно-поступательное движение в радиальном направлении внутри цилиндрического блока. В неподвижной оси имеются отверстия и прорезы, через которые рабочая жидкость подводится под поршни и уходит из-под них.

Характерной особенностью насосов этой серии является относительно низкая производительность в сочетании с большим напором. Высокая частота вращения обуславливает применение этих машин в качестве насосов гидропривода в таких областях, где большое значение придается габаритам и весу, например в самолетостроении. Эти объемные насосы сравнительно редко применяются для подачи воды, поскольку при относительно высокой стоимости они малопроизводительны. Из-за минимального зазора между движущимися частями насос не может работать с жидкостями, содержащими механические примеси.

ЭРЛИФТЫ

Эрлифт представляет собой трубу с открытыми концами, в которую нагнетается воздух; часть трубы опущена в воду, т. е. находится ниже уровня открытой поверхности воды (рис. 11.40). Степень погружения трубы может быть различной и зависит от области применения насоса. Принцип действия насоса основан на разности между удельным весом воды, окружающей трубу снаружи, и удельным весом водовоздушной смеси, наполняющей трубу. Пока в трубе нет воздуха, давление окружающей жидкости заставляя воду в трубе подниматься на высоту h_s (см. рис. 11.40). При нагнетании воздуха удельный вес образовавшейся в трубе

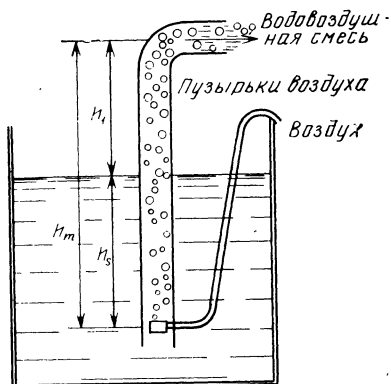


Рис. 11.40. Эрлифт

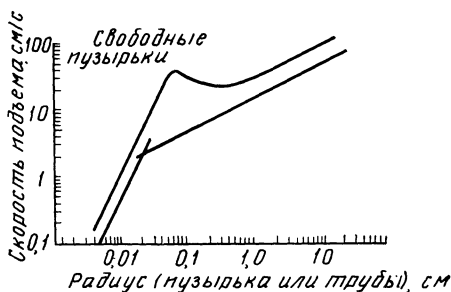


Рис. 11.41. Скорость подъема пузырьков воздуха в столбе неподвижной воды

водовоздушной смеси становится меньше удельного веса чистой жидкости. На основании законов гидростатики можно записать

$$h_m \gamma_m = h_s \gamma_1, \quad (11.20)$$

где h_m — высота столба водовоздушной смеси в трубе; γ_m — удельный вес водовоздушной смеси; h_s — глубина погружения устройства для впуска воздуха в трубу эрлифта; γ_1 — удельный вес жидкости, окружающей трубу снаружи.

Поскольку плотность воздуха меньше плотности такой жидкости, как вода, удельный вес водовоздушной смеси будет меньше удельного веса жидкости (т. е. $\gamma_m < \gamma_1$), и, следовательно, чтобы выражение (11.20) оставалось равенством, h_m должна быть больше h_s . Таким образом, уровень водовоздушной смеси в трубе будет подниматься до тех пор, пока не установится такое соотношение переменных параметров, при котором будет справедливо уравнение (11.20). Однако, если непрерывно подавать в эрлифт достаточное количество воздуха, наступит такой момент, когда разность между удельным весом водовоздушной смеси и удельным весом жидкости увеличится настолько, что $h_m - h_s$ станет больше h_1 — высоты подъема воды. Водовоздушная смесь начнет вытекать из верхнего конца трубы раньше, чем наступит равновесие, выраженное уравнением (11.20). После того как насос начнет подавать воду, $h_s \gamma_1$ будет оставаться больше, чем $h_m \gamma_m$, и жидкость под действием силы тяжести станет непрерывно поступать в нижний открытый конец трубы. Поддерживая подачу воздуха на определенном уровне, можно обеспечить непрерывную работу насоса.

Воздушный поток, при котором $h_m \gamma_m = h_s \gamma_1$, — это минимальный воздушный поток, необходимый для работы насоса. Если допустить, что в начале работы насоса $h_0 = h_1$, зависимость между ве-

личиной заглубления трубы h_s и количеством воздуха в водовоздушной смеси будет выражаться формулой Эндина (Andeen, 1974)

$$h_0 = Q_a / (1 - Q_a h_s). \quad (11.21)$$

Тодороки и др. (Todoroki et al., 1973) определяют минимальный воздушный поток, при котором насос начинает работать, как

$$Q_{am} = \frac{0,35 (1 - M_s) A \sqrt{gd}}{1,2 M_s - 0,2}, \quad (11.22)$$

где Q_{am} — минимальный воздушный поток, при котором насос начинает работать, $\text{см}^3/\text{с}$; M_s — относительное погружение h_s/h_m ; A — площадь поперечного сечения трубки воздухоподающего эрлифта, см^2 ; g — ускорение силы тяжести, $\text{см}/\text{с}^2$; d — диаметр трубы эрлифта, см .

Уравнение (11.22) получено опытным путем, при этом регистрировалась скорость подъема пузырьков воздуха в вертикальной трубе, заполненной неподвижной водой. Экспериментальные данные, полученные для труб диаметром от 25 до 100 мм, длиной от 4 до 42 м при относительном погружении от 0,4 до 0,8, хорошо соответствуют уравнению (11.22) (Todoroki et al., 1973).

Размер пузырьков воздуха оказывает влияние на характеристики эрлифта. Теоретически установлено, что скорость пузырьков относительно жидкости, или разность абсолютных скоростей пузырьков и жидкости (т. е. скольжение), связана линейной зависимостью с размером пузырьков (Ivens, 1914): чем меньше размер пузырьков, тем меньше скольжение. Поскольку со скольжением связана основная доля энергетических потерь в эрлифте, уменьшение скольжения до минимума, позволяет повысить эффективность насоса. Можно считать, что скольжение почти тождественно скорости подъема пузырьков в спокойной воде (Andeen, 1974). Кривые на рис. 11.41 показывают скорость подъема пузырьков различного диаметра в столбе неподвижной воды. Когда пузырьки воздуха становятся настолько большими, что заполняют все сечение трубы, они превращаются в воздушные скопления и начинают двигаться. В трубах небольшого диаметра скорость этого движения зависит от вязкости жидкости, в то время как в эрлифтах с трубами больших диаметров скорость подъема воздушных скоплений определяется главным образом силами инерции. Из анализа кривых на рис. 11.41 видно, что скольжение уменьшается, когда по трубе поднимаются не пузырьки, а воздушные скопления. Однако это не совсем так, поскольку, если воздушное скопление разбить на более мелкие пузырьки, они будут подниматься медленнее, чем воздушные скопления. Скорость подъема пузырьков зависит также от качества поверхности внутренней стенки трубы.

В идеале пузырьки воздуха в трубе эрлифта должны быть как можно меньше. Однако для практического осуществления этого принципа существует ряд трудностей. Подъем пузырьков в столбе жидкости начинается с того момента, когда в нем наберется достаточное количество воздуха, по крайней мере, 10% объема (или несколько меньше) (Andeen, 1974). Объединение пузырьков в

скопления происходит при более высоком содержании воздуха в воде. Поскольку воздух, поднимаясь в столбе жидкости, расширяется (давление в трубе снижается), в нижнем конце трубы содержание воздуха в воде может составлять менее 10%. При соблудении такого соотношения между воздухом и водой максимальный напор, развиваемый эрлифтом, будет равен примерно $0,1h_s$. Это является серьезным препятствием для промышленного применения эрлифтов. Чтобы уменьшить глубину погружения, приходится увеличивать подачу воздуха, тогда содержание воздуха в воде будет превышать 10%, однако это отразится на КПД насоса.

Есть и другие препятствия для формирования очень мелких пузырьков воздуха. Для образования мелких пузырьков обычно применяют выходные отверстия небольшого размера. Размер пузырька, исходящего из отверстия, может быть определен по следующей формуле при условии введения экспериментально полученного поправочного коэффициента, равного 0,875 (Andeen, 1974):

$$R_b = \left[\frac{(St) (R_0)}{g (\rho_e - \rho_g)} \right], \quad (11.23)$$

где R_b — радиус пузырьков, см; St — коэффициент поверхностного натяжения, г·см/с²; R_0 — диаметр отверстия, см; g — ускорение силы тяжести, см/с²; ρ_e — плотность жидкости, г/см³; ρ_g — плотность газа, г/см³.

Так, для воды комнатной температуры пузырек радиусом 1 см можно получить из отверстия радиусом 1 см. Для получения пузырька радиусом 0,01 см потребуется отверстие радиусом приблизительно 10^{-6} см. Если даже удастся создать такое отверстие, резкое падение давления при прохождении через него повлечет за собой снижение эффективности всей системы. Другой способ образования мелких пузырьков основан на действии сил сдвига, однако в этом случае потребуется очень большая энергия, которая значительно снижает КПД всей системы при размере пузырьков 10^{-2} см или менее (Andeen, 1974).

В конструкции эрлифтов большое значение придается также высоте заглубления. Как видно из уравнения (11.20), чем больше глубина погружения, тем больше напор, развиваемый эрлифтом. Однако чем больше высота заглубления, тем длиннее должна быть труба эрлифта. Между величиной потерь на трение о стенки трубы и ее длиной существует линейная зависимость. Величина потерь на трение связана со скоростью движения потока квадратичной зависимостью. Для компенсации этих потерь необходимо увеличивать напор.

Соотношение между объемами воздуха и воды в эрлифте (помимо того, что оно определяет условия начала движения потока водовоздушной смеси) значительно влияет на величину подачи. Такие свойства жидкости, как вязкость и температура, также отражаются на характеристиках эрлифта.

КПД эрлифта складывается из гидравлического КПД e_h , КПД системы распределения воздуха e_a и КПД компрессора. КПД воздушного компрессора обусловлен его конструкцией и зависит от

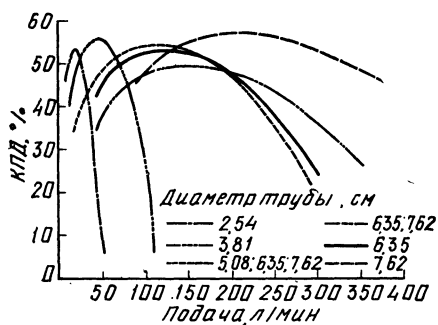


Рис. 11.42. Влияние диаметра трубы эрлифта на гидравлический КПД. Длина трубы эрлифта 18,25 м, труба погружена на 70 % своей длины (Ward, 1924)

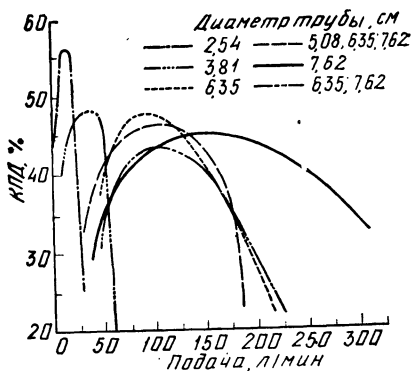


Рис. 11.43. Влияние диаметра трубы эрлифта на гидравлический КПД. Длина трубы 18,25 м, труба погружена на 50 % своей длины

давления и объема на выходе из компрессора, а также от некоторых других факторов. В системах по разведению водных организмов, в частности работающих по замкнутому циклу, очень важно не допустить попадания масла в сжатый воздух. Это осуществляется с помощью уплотнительных колец из графита или тефлона (так называемый маслонепроницаемый компрессор). Потери в системе распределения воздуха зависят от массового расхода и ее конструктивных особенностей. Эти потери могут быть до некоторой степени уменьшены увеличением размера воздушной трубы и (или) регулированием устройства подачи воздуха.

Гидравлический КПД эрлифта определяется как отношение полезной работы, выполненной жидкостью, к изотермической энергии расширения воздуха (Pickert, 1932):

$$e_h = \frac{\gamma_l Q_l h_l}{P_a Q_g \ln(P_l/P_a)}, \quad (11.24)$$

где γ_l — удельный вес жидкости, Н/м³; Q_l — массовый расход жидкости, м³/с; h_l — напор (расстояние между уровнем открытой поверхности воды и выходным отверстием эжектора), м; P_a — абсолютное атмосферное давление, Па; Q_g — массовый расход газа, м³/с; P_l — атмосферное давление плюс $h_s \gamma_l$ (т. е. абсолютное давление у нижнего конца эрлифта), Па.

Гидравлический КПД эрлифта зависит от массового расхода, размера трубы, соотношения объемов воды и воздуха в водовоздушной смеси и высоты заглубления. График на рис. 11.42 показывает, как изменение диаметра трубы эрлифта длиной 18,25 м, заглубленной на 70% своей длины, влияло на гидравлический КПД. Изменение массового расхода осуществлялось дросселированием воздушного потока. Как видно из рисунка, при переходе к трубам большего диаметра гидравлический КПД увеличивается. Этого следовало ожидать, так как потери на трение, приходящие-

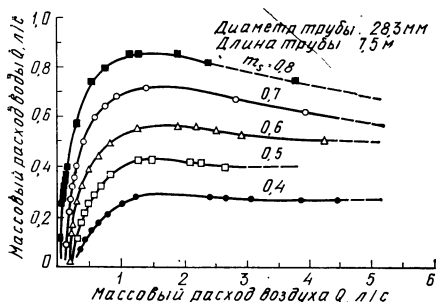


Рис. 11.44. Зависимость расхода жидкости от изменения подачи воздуха в эрлифт при различной степени относительного погружения (Todoroki et al., 1973)

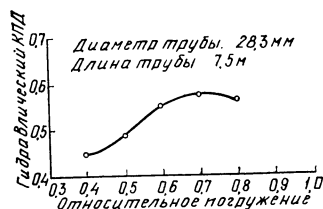


Рис. 11.45. Зависимость гидравлического КПД эрлифта от степени относительного погружения

ся на единицу объема воды, снижаются при подаче воды по трубе большего диаметра. Интересно также отметить, что чем меньше диаметр трубы, тем уже диапазон подач, соответствующих режиму максимального КПД.

Работа того же эрлифта в тех же условиях, но при другой высоте заглубления (50 % длины трубы) описывается кривыми, изображенными на рис. 11.43. При уменьшении высоты заглубления с 70 до 50 % длины трубы КПД снижается при всех диаметрах, за исключением диаметра 2,5 см. Более узкие трубы работают с хорошим КПД при заглублении на 45—50 % их длины. Однако для обеспечения более высокого массового расхода на режиме максимального КПД следует увеличивать высоту заглубления. Чтобы продемонстрировать роль отношения объема подаваемого воздуха к объему перекачиваемой жидкости, построен график (рис. 11.44), по одной оси которого отложены значения массового расхода жидкости Q_1 , а по другой — значения массового расхода газа Q_g для нескольких значений заглубления M_s . Из рисунка видно, что при постоянной подаче воздуха с увеличением заглубления массовый расход жидкости также возрастает. Кривая зависимости Q_1 от Q_g при заданном заглублении сначала круто поднимается, достигает максимума, затем принимает более пологую форму и заканчивается почти горизонтальным участком. С увеличением подачи воздуха удельный вес водовоздушной смеси в трубе воздушного эрлифта уменьшается. Это приводит к возрастанию подачи. Потери на трение, прямо пропорциональные скорости движения водовоздушной смеси, с увеличением подачи насоса также возрастают. Таким образом, слева от максимума расхода жидкости (см. рис. 11.44) преобладающую роль играет возросший рабочий напор. Справа от максимума сильнее сказывается влияние потерь на трение; уменьшение подачи частично обусловлено и увеличением количества воздуха в насосе.

Кривая зависимости гидравлического КПД эрлифта от относи-

тельного заглубления приведена на рис. 11.45. Для эрлифтов других конструкций эта базовая кривая КПД смещается вправо или влево, но характер ее остается неизменным. Таким образом, для каждого эрлифта существует только одно значение относительно заглубления, при котором он работает в режиме максимального КПД.

Несмотря на значительный объем накопленных знаний, аналитические формулы для расчета и проектирования эрлифтов до сих пор не выведены. Приходится пользоваться эмпирическими уравнениями, в частности выражение для подсчета объема свободного воздуха (в м³), необходимого для подъема 1 л воды (Henderson and Perry, 1955), имеет следующий вид

$$Q = \frac{0,8h_1}{C \log_{10} (h_s + 10,36)/10,36}, \quad (11.25)$$

где Q — объем свободного воздуха, необходимый для подъема 1 л воды, м³; h_1 — высота подъема воды, м; C — константа (см. табл. 11.1); h_s — глубина погружения, м.

Таблица 11.1. Значения константы C из уравнения (11.25) (Ivens, 1914)

Высота подъема воды, м	Значение C
3—18	9981
18—61	9492
61—152	8800
152—198	7537
198—230	6355

Уравнение (11.25) справедливо для ряда значений высоты подъема воды (от 3 до 230 м). В лабораторных условиях часто возникает необходимость закачивать воду на высоту менее 3 м. К сожалению, в этом случае формула (11.25) непригодна. График зависимости глубины погружения от массового расхода воды в минуту и расхода свободного воздуха в минуту приводится в книге «Подземные воды и источники» (Ground Water and Wells, 1966). Этот график хорошо соответствует уравнению (11.25) в пределах значений высоты подъема воды от 6 до 122 м и глубины погружения от 15 до 90 %.

КПД 60% или выше для эрлифта — редкое явление. Это обстоятельство ограничивает его применение в качестве водяного насоса, так как суммарный КПД, равный произведению гидравлического КПД эрлифта, КПД системы распределения воздуха и КПД воздушного компрессора, будет гораздо ниже 50%. КПД других типов насосов выше, чем у эрлифта, поэтому они более экономичны. Однако в двух случаях применение эрлифтов весьма целесообразно. Они обычно применяются для перекачивания коррозионно-активных жидкостей или жидкостей, содержащих зна-

чительное количество механических примесей. Другая особенность насоса, обуславливающая возможность его применения на предприятиях по разведению водных организмов, связана с принципом работы, предусматривающим введение кислорода в перекачиваемую жидкость. На этих предприятиях часто возникает необходимость аэрировать перекачиваемую воду. Для этого в систему вводят либо эрлифты, либо насосы и аэраторы, либо установку, состоящую из насоса и аэратора. Иногда оказывается более выгодным перекачивать воду эрлифтом, полностью исключив из системы аэраторы. При выборе устройства для насыщения воды кислородом рекомендуется провести сравнительный анализ экономической эффективности двух систем. Если выбор сделан в пользу эрлифта, а не обычной установки из насоса (насосов) и аэраторов, следует обратить внимание на способность эрлифта обеспечивать систему достаточным количеством кислорода.

Эрлифты редко работают при заглублении менее 50%. На практике максимальный КПД эрлифта, как правило, обеспечивается при заглублениях от 65 до 75%. По-видимому, максимальный КПД эрлифтов с трубами небольшого диаметра (менее 2,5 см) достигается при меньшем заглублении.

ВЫБОР НАСОСА

Чтобы правильно подобрать насос, необходимо знать характеристики насосов различных типов, параметры системы, в которой насос будет работать, т. е. напор и подачу, и свойства перекачиваемой жидкости. Эти же параметры плюс высота всасывания насоса следует принимать во внимание при выборе насоса для систем, в которых важную роль играет высота всасывания. Если воду предполагается брать из скважины, необходимо также изучить характеристики понижения уровня грунтовых вод в скважине.

Характеристики насосов различных типов были рассмотрены выше. В большинстве случаев требования заказчика сводятся к тому, чтобы насос работал с максимальной экономичностью. Таким образом, выбираемый насос должен работать в режиме максимального КПД или близко к этому режиму. Если для заданной системы можно подобрать несколько насосов, которые будут работать близко к режиму максимального КПД, следует сделать выбор в пользу машины, требующей наименьших эксплуатационных расходов. Однако при определении общей суммы затрат помимо эксплуатационных расходов необходимо учитывать также стоимость насоса и затраты на его установку.

Максимальный располагаемый избыточный напор насоса не должен превышать; в противном случае возникает кавитация, которая приводит к значительному возрастанию расходов на техническое обслуживание и снижению КПД.

Полный напор, на который следует выбирать насос, определяется как сумма гидростатического напора, потерь на трение жидкости о стенки трубопроводов и динамического напора. Вели-

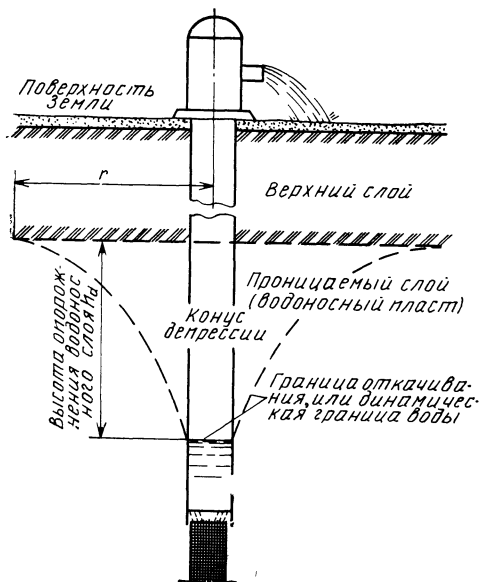


Рис. 11.46. Понижение уровня грунтовой воды в скважине

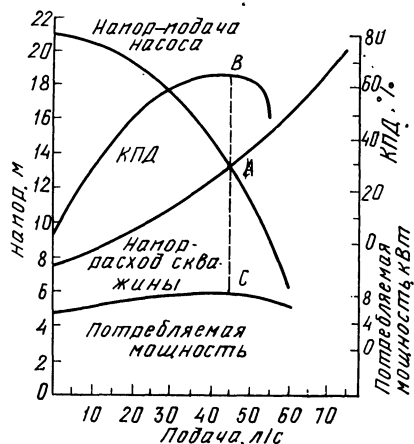


Рис. 11.47. Выбор центробежного насоса для откачивания воды из скважины (Code, 1936)

чина гидростатического напора зависит от высоты подъема жидкости в напорной линии, удельного веса жидкости и высоты всасывания. Потери на трение зависят от скорости жидкости в трубопроводах, качества и конструкции трубопровода, количества и типа арматуры в системе, а также других факторов. Динамический напор определяется конструкцией трубопровода, поскольку скорость жидкости зависит от размера труб (см. главу 9).

Важную роль играет фактор понижения уровня грунтовых вод в скважине (рис. 11.46). Пока насос не качает воду из скважины, уровень воды в ней соответствует верхнему уровню водоносного пласта или превышает его. Последнее означает, что уровень воды в источнике, питающем водоносный слой, находится выше уровня воды в самом водоносном слое вблизи скважины. Во время откачивания вода поступает из скважины со скоростью, соответствующей производительности насоса. По мере того как вода покидает скважину, последняя будет вновь наполняться водой, поступающей из водоносного слоя. Скорость поступающего потока воды зависит от величины напора, вызвавшего движение этого потока, и проницаемости водоносного пласта. При прочих равных условиях поток на единицу поперечного сечения водоносного пласта прямо пропорционален его проницаемости. Выкачивание воды из скважины повлечет за собой снижение уровня воды h_d в ней из-за некоторой потери напора внутри пласта, под действием которого вода поступает в скважину. Чем выше интенсивность выкачивания, тем

быстрее будет снижаться напор в водоносном слое. При постоянном режиме работы насоса уровень открытой поверхности воды в водоносном слое примет очертания поверхности перевернутого конуса (см. рис. 11.46). Причем по мере приближения к скважине угол наклона этой поверхности к горизонту будет увеличиваться. Этот конус называют «конусом депрессии» вокруг скважины. Высота конуса депрессии h_d зависит от скорости выкачивания воды из скважины, проницаемости водоносного пласта, диаметра скважины и некоторых других факторов.

Высота конуса депрессии влияет на выбор насоса следующим образом. Во-первых, необходимо проверить, сохранится ли производительность насоса при изменении напора в водоносном слое после того, как в нем сформируется конус депрессии. По мере увеличения скорости откачивания воды h_d будет возрастать до тех пор, пока не станет равным расстоянию от верхнего уровня водоносного пласта до дна скважины или до нижнего уровня водоносного пласта (в зависимости от того, что произойдет раньше). Последнее условие определяет максимальную производительность скважины.

Диаметр основания конуса депрессии может изменяться от нуля до нескольких сотен метров. Если вблизи от первой скважины пробурить еще одну и конусы депрессии обеих скважин пересекутся, общая производительность двух скважин будет меньше удвоенной производительности одной скважины. Об этом не следует забывать при проектировании крупных хозяйств по разведению водных организмов, водоснабжение которых производится из скважин.

Выбор центробежного насоса для откачивания воды из скважины с помощью кривых показан на рис. 11.47. Для скважины строится кривая напор — расход и для требуемого расхода определяется напор. Наиболее благоприятный режим работы насоса будет соответствовать точке A на характеристике скважины. Другие характеристики насоса также приведены на графике. Напорная характеристика выбираемого насоса должна пересечь характеристику скважины в точке A или, если сделать поправку на износ, несколько выше этой точки. Кроме того, требуемая подача, определяемая точкой A , должна обеспечиваться насосом в режиме максимального КПД. Вертикальная проекция точки A на кривую КПД — точка B должна совпасть с точкой максимального КПД для выбранного насоса. Вертикальная проекция точки A на кривую потребляемой мощности — точка C соответствует величине потребляемой мощности насоса в этом рабочем режиме.

При выборе насоса для работы в скважине важно помнить, что уровень воды в скважине может понизиться в засушливые годы, особенно это относится к неглубоким скважинам. В этом случае приходится увеличивать напор насоса. Новые условия работы отразятся и на эффективности насоса, которая может заметно понизиться без существенного изменения подачи. Если предполагается некоторое изменение уровня воды в скважине, наиболее под-

ходящим окажется насос, кривая КПД которого будет иметь максимально плоский участок в области параметров, соответствующих рабочему режиму насоса.

Все изложенное относилось к выбору насоса для откачивания воды из скважины, выбор центробежного насоса для систем с другими источниками водоснабжения ничем существенным не отличается. Прежде всего необходимо определить напорную характеристику системы. Наложением этой характеристики на характеристические кривые ряда насосов выбирают насос, обеспечивающий требуемые параметры (напор и подачу) в режиме максимального КПД. Если по условиям работы системы подача и напор насоса будут все время изменяться таким образом, что при одинаковом напоре насос должен обеспечивать различную подачу, либо несколько значений подачи будут обеспечиваться насосом при разных значениях напора, насос следует выбирать на сочетание максимальных параметров. Подачу в этом случае можно регулировать дросселированием. Область допустимых значений КПД — наиболее плоский участок на кривой — должна соответствовать диапазону рабочих режимов насоса, причем максимально длительную нагрузку машина должна обеспечивать в режиме максимального КПД.

Помимо напора, подачи и других переменных при выборе насоса необходимо также учитывать и высоту всасывания. Располагаемый избыточный напор (РИН), учитывающий этот параметр, — это как раз то давление, под действием которого жидкость втягивается во входной патрубок насоса. Для каждой системы можно подсчитать величину располагаемого избыточного напора. Это будет расчетный РИН. Необходимый РИН определяется из условия отсутствия кавитации для данного насоса, обычно требуемый РИН указывается в паспорте насоса. Расчетный располагаемый избыточный напор системы должен превышать паспортный для выбираемого насоса. РИН зависит также от удельной частоты вращения. С ростом удельной частоты вращения при условии, что полный напор, развиваемый насосом, поддерживается постоянным, появляется тенденция к возрастанию высоты всасывания.

Выбор машин объемного типа предполагает такую же процедуру, однако он упрощается тем, что зависимость расхода от частоты вращения у машин этого типа носит почти линейный характер.

Другой специфической особенностью этих машин является относительное постоянство КПД, несмотря на то что при переходе к насосам с большей подачей обнаруживается тенденция к возрастанию КПД. Все это позволяет регулировать подачу большинства машин объемного типа изменением частоты вращения вала двигателя. Тем не менее в паспорте насоса указывается расчетная рекомендуемая частота вращения или, по крайней мере, максимальная частота вращения для данного насоса. При определении максимальной частоты вращения обычно исходят из конструктивных соображений.

В качестве исходных данных для выбора насоса должны быть известны, по крайней мере, следующие параметры: требуемый полный напор, требуемая подача, необходимая высота всасывания, свойства перекачиваемой жидкости, предполагаемая продолжительность включения, тип привода, предельные габариты и вес, особые требования.

Выбирая насос объемного типа, необходимо прежде всего установить целесообразность его применения в данной системе. Для этого изучают характеристики системы и свойства перекачиваемой жидкости. На этом этапе учитывают и экономические факторы. После того как установлен тип насоса, выбирают его типоразмер. Материал, из которого должны быть изготовлены узлы насоса, определяется условиями работы и характеристиками перекачиваемой жидкости. От материала существенно зависит стоимость насоса. Окончательный выбор насоса сводится к решению таких проблем, как стоимость, наличие в продаже и надежность, а также совместимость с источником энергии.

ПРИВОД НАСОСА

Потребляемая насосом мощность зависит от объема и удельного веса перекачиваемой жидкости, напора, необходимого для преодоления сопротивления сети и подъема жидкости, КПД насоса и привода. Мощность на выходе насоса (MBH в Вт) определяется по формуле

$$MBH = \gamma Qh, \quad (11.26)$$

где γ — удельный вес, Н/м³; Q — объемная скорость потока, м³/с; h — полный напор, м.

Потребляемая мощность привода определяется по формуле

$$PM = MBH/\epsilon, \quad (11.27)$$

где PM — потребляемая мощность насоса, Вт; MBH — мощность на выходе насоса, Вт; ϵ — КПД насоса.

Подставив значение MBH из формулы (11.26) в формулу (11.27), можно получить следующее выражение:

$$PM = Q\gamma h/\epsilon. \quad (11.28)$$

Потребляемая мощность PM — это мощность, которая расходуется на преодоление гидростатического и динамического напоров, компенсацию гидравлических потерь в системе и насосе.

Выбирая двигатель для привода, необходимо подобрать такой двигатель, который при расчетной частоте вращения будет обеспечивать высокий КПД насоса. По сравнению с другими источниками мощности двигатели внутреннего сгорания и электродвигатели бесспорно занимают первое место в качестве привода насосов. Тип и размер привода определяются такими факторами, как вели-

чина потребляемой мощности, стоимость, эксплуатационные расходы, частота и продолжительность включения, доступность энергии.

В качестве топлива для двигателей внутреннего сгорания обычно используют бензин, дизельное топливо, природный газ или пропан. При этом чаще всего применяется бензин, почти также широко используется дизельное топливо, хотя оно и стоит на втором месте после бензина. Во многих районах легко доступны природный газ и (или) пропан. Дизельный двигатель дороже двигателя, работающего на бензине, однако дешевое топливо и минимальные расходы на техническое обслуживание дизельного двигателя компенсируют первоначальные затраты на его приобретение. Предел рентабельности дизельного двигателя по сравнению с бензиновым определяется в первую очередь разностью между расходами на топливо и техническое обслуживание и расходами на приобретение двигателя. Действительное безубыточное время работы двигателя за год в часах зависит от местных цен.

Безубыточное время эксплуатации для экономического сравнения различных двигателей можно определить по следующей формуле:

$$\left(\frac{\text{первоначальная стоимость}}{\text{предполагаемый срок службы}} \right)_1 + (\text{продолжительность эксплуатации за год, часы})_1 (\text{эксплуатационные расходы в пересчете на 1 ч})_1 = \\ = \left(\frac{\text{первоначальная стоимость}}{\text{предполагаемый срок службы}} \right)_2 + (\text{продолжительность эксплуатации за год, часы})_2 (\text{эксплуатационные расходы в пересчете на 1 ч})_2. \quad (11.29)$$

Индекс 1 относится к первому двигателю, индекс 2 — ко второму. Поскольку время эксплуатации для обоих двигателей одинаково, решение этого уравнения относительно параметра «время эксплуатации за год в часах» даст рентабельность в часах за год. Первые слагаемые в левой и правой частях уравнения (11.29) определяют ежегодные капитальные вложения, а вторые слагаемые — ежегодные эксплуатационные расходы. Пользуясь уравнением (11.29), можно провести сравнительный анализ двух двигателей, работающих в одинаковых условиях, если в объем капитальных и эксплуатационных затрат входят все расходы, связанные с приобретением и использованием этих машин.

Привод должен работать под постоянной нагрузкой все время, пока работает насос. Привод подбирают обычно по выходной мощности, однако двигатель внутреннего сгорания не может непрерывно работать с номинальной нагрузкой, иначе это приведет к аварии. Так, в случае применения бензинового двигателя с воздушным охлаждением потребляемая мощность на валу насоса будет составлять только 60% его номинальной мощности. Бензиновые двигатели с водяным охлаждением работают с нагрузкой до

70% номинальной мощности, дизели могут работать с нагрузкой до 80% номинальной мощности.

Наибольшее распространение в качестве привода насосов получили, по-видимому, электродвигатели. Они компактны, относительно мало весят, работают, не загрязняя производственного помещения, и их нагрузка может составлять 100% номинальной мощности, причем продолжительность их работы в таком режиме соответствует расчетной, указанной в паспорте машины. При относительно невысокой стоимости они требуют минимального технического обслуживания. Запуск двигателей очень прост, кроме того, их можно монтировать как в горизонтальном, так и в вертикальном положении. К сожалению, в тех районах, где нет электричества, приходится иногда пользоваться другими типами привода.

Передача энергии от источника мощности к насосу происходит с наибольшей эффективностью, когда возможно непосредственное соединение насоса и двигателя. В этом случае на валу между двигателем и насосом должно быть установлено гибкое муфтовое соединение, исключающее возможную перегрузку подшипников, которая может возникнуть из-за несоосности валов. Центробежные насосы соединяются с электродвигателем напрямую, в этом их основное преимущество. Если необходимо, чтобы вал насоса и вал приводного устройства вращались с разной частотой, соединение можно выполнить несколькими способами. Наиболее эффективным является соединение через зубчатую передачу, которое должно применяться всегда, когда это возможно. Однако в некоторых случаях более целесообразным может оказаться применение клиноременной или плоскоременной передачи. Из них более предпочтительной является клиноременная передача, так как она характеризуется более высоким КПД.

REFERENCES

ASME — American Society of Mechanical Engineers (1959). Instruments and Apparatus. Part 5, Measurement of Quality of Materials, Chapter 4, Flow Measurement. Supplement to ASME Power Test Codes.

Andeen, G. B. (1974). Bubble Pumps. *Compressed Air Magazine*, Washington, D. C., January, pp. 16—18.

Berkeley Pump Catalogue (1965). Berkeley Pump Company, Berkeley, Calif. Code, W. E. (1936). Equipping a Small Irrigation Pumping Plant. *Colorado Agricultural Experimental Station Bulletin* 433.

Doolen, John (1972). Pumping Abrasive Fluids. *Plant Engineering* 26 (23): 128, 130.

Eckman, Donald P. (1950). *Industrial Instrumentation*. Wiley, New York.

Fang, Ken Show (1974). Speed-Torque Curve is Pump Start-up Clue. *Power* 118 (7): 44—45.

Fluid Meters, Their Theory and Application, 5th ed. (1959). American Society of Mechanical Engineers, New York.

Frevort, Richard K., Glenn O. Schwab, Talcott W. Edminster, and Kenneth K. Barnes, 3rd printing (1962). *Soil and Water Conservation Engineering*. Wiley, New York.

Ground Water and Wells, 1st ed. (1966). Edward E. Johnson, Inc., St. Paul, Minn.

- Harris, Elmo G. (1917). *Compressed Air Theory and Computations*. McGraw—Hill, New York.
- Henderson, S. M. and R. L. Perry (1955). *Agricultural Process Engineering*. Wiley, New York.
- Hicks, Tyler G. and T. W. Edwards (1971). *Pump Application Engineering*. McGraw—Hill, New York.
- Holland, F. A. and F. S. Chapman (1966). *Pumping of Liquids*, Reinhold, New York.
- Israelsen, Orson W. and Vaughn E. Hansen (1950). *Irrigation Principles and Practices*. Wiley, New York.
- Ivens, Edmund M. (1914). *Pumping with Compressed Air*. Wiley, New York.
- Jabsco Pump Curve (1975). Jabsco Pump Company, Costa Mesa, Calif.
- Kristal, Frank A. and F. A. Annett (1940). *Pumps — Types, Selection, Installation, Operation and Maintenance*. McGraw—Hill, New York.
- Messina, J. P. (1973). Consider Starting Conditions Before Specifying Propeller Pumps. *Power Engineering* 77(1): 58—60.
- Myers Centrifugal Pump Catalogue (1966). Section 180, Industrial Pumps. F. E. Myers Brothers Company, Ashland, Ohio.
- National Engineering Handbook (1959). Section 15, Irrigation, Chapter 8, Irrigation Pumping Plants. U. S. Département of Agriculture, Soil Conservation Service, Washington, D. C.
- Pickert, Ing F. (1932). The Theory of the Airlift Pump. *Engineering* 134: 19—20, July.
- Pump Performance Curves (1975). Roper Pump Company, Commerce, Ga.
- Richards, Frank (1913). *Compressed Air Practice*. McGraw—Hill. New York.
- Scobie, G. (1974). Select the Pump that Meets Your Needs. *Chartered Mechanical Engineer* 21 (5): 59—63.
- Spotte, Stephen H. (1970). *Fish and Invertebrate Culture Water Management in Closed Systems*. Wiley-Interscience, New York.
- Todoroki, Ichiro, Yoshifusa Sato, and Toru Honda (1973). Performance of Airlift Pump. *Bulletin of Japan Society of Mechanical Engineers* 16 (94): 733—741.
- Vickers Industrial Hydraulics Manual (1962). Vickers, Inc., Troy, Mich.
- Ward, Clayton N. (1924). An Experimental Study of Airlift Pumps. *Water Works*, pp. 1273—1278, June.
- Yedidiah, S. (1974). Analyzing Suction Performance of Centrifugal Pumps. *Plant Engineering* 28 (20): 69—72.

Глава 12. ПРУДЫ, БАССЕЙНЫ И ДРУГИЕ СООРУЖЕНИЯ ДЛЯ СОДЕРЖАНИЯ ВОДНЫХ ОРГАНИЗМОВ

Для культивирования рыб, моллюсков и ракообразных используются пруды, бассейны, каналы, сетные и другие сооружения. Ниже рассмотрены использование и устройство таких сооружений, а также уход за ними.

пруды

Пруды — это водоемы, которые по размеру обычно меньше, чем озера. Большинство используемых в рыбоводстве прудов являются искусственными сооружениями двух основных типов: копаные и обвалованные пруды. Обвалованные пруды создаются путем строительства плотин, дамб и подобных надземных сооружений для запруживания воды. Такие пруды получили широкое распространение, так как их можно строить в различных условиях рельефа. Обвалованные пруды имеют и другие преимущества по срав-

нению с копаными, сооружаемыми путем выемки грунта для образования котлована, заполняемого водой. Хотя копаные пруды и имеют некоторые недостатки, их приходится сооружать в районах со сравнительно плоским рельефом. Основным недостатком копаных прудов является высокая стоимость земляных работ, при этом воду из сооружаемого пруда приходится откачивать насосом. При сооружении некоторых прудов иногда необходима и выемка грунта, и обваловка.

Обвалованные пруды. Выбор участка. При сооружении любого пруда большое значение имеет выбор подходящего участка. Этот фактор определяет стоимость строительства пруда и оказывает большое влияние на экономическую эффективность всего предприятия. Хотя обвалованные пруды можно сооружать в разнообразных топографических условиях, наиболее благоприятно наличие умеренных уклонов в одном или двух направлениях. При крутых уклонах пруды получаются небольшими и глубокими, а строительство требует большого объема земляных работ. Подходящим местом для строительства пруда является овраг с пологими склонами и небольшим продольным уклоном.

Подходящим участком является также местность с небольшим уклоном (1—5%), на которой можно сооружать пруды путем возведения дамб по их периметру. При наличии небольшого уклона вода переходит из пруда в пруд самотеком. Участок такого типа подходит для строительства выростных каналов.

При выборе участка наряду с уклоном местности большое значение имеет также характер грунта. Грунт должен обладать низкой проницаемостью, иначе возможна чрезмерная потеря воды в результате просачивания, и потребуются дорогостоящие устройства для предотвращения фильтрации через ложе и откосы пруда.

Меры по предотвращению фильтрации рассмотрены ниже.

Для обеспечения прудов водой высокого качества и в достаточном количестве необходимы подходящие источники водоснабжения. Ключи и большие родники, как правило, обеспечивают постоянный расход в течение всего года, тогда как расходы поверхностных источников воды колеблются в зависимости от сезона, количества осадков и других факторов. Пруды, сооружаемые в местах стока поверхностных вод в пруд, следует защищать от поступления чрезмерного количества воды. Ручьи ни в коем случае не должны протекать непосредственно через пруды, так как это приведет к заиливанию, затоплению и другим нежелательным последствиям. Если источником водоснабжения является ручей, пруды следует строить с одной из его сторон и отводить из него воду в пруды по мере необходимости. Следует предусмотреть меры защиты от затопления прудов во время паводков.

При выборе участка необходимо учитывать также правовые аспекты: ограничения, налагаемые на отвод поверхностных и грунтовых вод, на качество и количество сбрасываемых вод, на вылов и продажу рыбы в течение всего года и т. д.

Хотя некоторые из этих правовых аспектов как будто очевидны, имеются и определенные сложности. Например, в некоторых районах не требуется разрешения на лов рыбы в прудах, использующих речную воду. Правила спортивного рыболовства, вводимые для охраны естественных запасов, обычно запрещают вылов рыбы определенных видов в любое время года, за исключением сезона спортивного рыболовства. Продолжительность сезона может колебаться от нескольких дней до нескольких месяцев в году, но даже в течение этого периода один человек имеет право выловить всего несколько штук рыб.

Устройство прудов. Внутренняя форма пруда зависит от культивируемого вида, рельефа участка и других факторов. Однако к рыбоводным прудам предъявляются определенные требования.

Почти во всех рыбоводных прудах желательно ограничить рост укореняющихся водных растений, поэтому площадь участков глубиной менее 1 м должна быть сведена до минимума. Для этого берега прудов должны быть максимально крутыми для данного грунта. Обычно земляные берега можно выполнять с откосами 2:1 или 3:1 (горизонталь к вертикали). Единственным природным материалом, позволяющим выполнить более крутые откосы, чем 2:1, является камень, тогда как неустойчивый грунт может потребовать откоса более пологого, чем 3:1. Можно сделать и вертикальные откосы, если использовать бетон, бетонные блоки, каменную кладку и другие материалы, но это увеличивает стоимость строительства.

Ложе пруда должно иметь уклон по направлению к водоспуску 1000:1 (горизонталь к вертикали), предпочтительнее от 1000:3 до 1000:6. Уклон можно и увеличить, если грунт ложа выдержит при спуске воды и глубина воды вблизи водоспуска не станет чрезмерной. Хьюет (Huet, 1970) даже рекомендует устраивать на ложе пруда сеть осушительных и сбросных канав. Главная канава должна иметь минимальный уклон 1000:1, а отходящие от нее боковые канавы — минимальный уклон 1000:5. Боковые канавы выполняются с шириной дна не менее 0,5 м и откосами 1,5:1. Расстояние между боковыми канавами в зависимости от грунта составляет от 10 до 50 м (Huet, 1970). Уклон ложа пруда и устройство сети канав облегчают спуск и осушение пруда. Сеть канав, возможно, и способствует более полному отводу воды из пруда, но правильно построенный пруд должен хорошо осушаться и без канав. Время от времени ложе осушенного пруда приходится обрабатывать, а сеть канав затрудняет работу, да и может быть разрушена при обработке ложа.

Участок возле водоспуска должен быть на 45—60 см ниже остального ложа пруда. Размер этого участка зависит от размеров пруда, но, как правило, составляет от 1 до 10% общей его площади. При спуске воды из пруда здесь собирается рыба. Эта яма устраивается главным образом для облегчения отлова рыбы, она должна быть достаточно большой, чтобы вместить всю рыбу и не

создавать дефицита кислорода, но не настолько большой, чтобы ее трудно было обловить неводом или другим каким-либо орудием лова.

Плотины и дамбы. При рассмотрении устройства плотин следует иметь в виду два момента: во-первых, все изложенное ниже относится к плотинам высотой не более 15 м, а большинство рыбоводных прудов редко имеют плотины выше 8 м; во-вторых, хотя в тексте употребляется термин «плотина», все, что касается ее устройства, в равной мере относится и к дамбам.

Основание. В вопросе об основании земляных плотин большое значение имеет прочность грунта, на котором предполагается строить плотину. Грунт должен выдержать вес плотины. Большинство уплотненных грунтов способны выдержать нагрузку рассматриваемых здесь небольших плотин. Болотистые и иловатые грунты следует использовать под основания лишь с большой осторожностью. Лучше всего снять эти грунты и закладывать плотину на подстилающем уплотненном грунте. Высокопластичные глинистые грунты также можно использовать под основание лишь при наличии рекомендации со стороны специалистов. Органогенные грунты ни в коем случае нельзя использовать под основание плотины, так как они со временем разлагаются, оседают, и опасность фильтрации воды увеличивается. Материал основания должен также иметь низкую водопроницаемость для предотвращения чрезмерных потерь воды в результате просачивания. Высокопроницаемые грунты можно использовать под основание плотины лишь при условии, что они способны выдержать нагрузку плотины и будут приняты меры к уменьшению фильтрации.

Одним из наиболее распространенных способов борьбы с потерями воды на фильтрацию на участках, где проницаемый поверхностный слой залегает над слоем низкой проницаемости (например, глина), является устройство врезающегося в основание зуба (рис. 12.1). Его сооружение начинается с рытья траншеи там, где будет заложена плотина, параллельно ей. Траншея, достаточно заглубленная в водонепроницаемый слой, должна иметь дно шириной не менее 1,25 м (ширина дна может быть и больше, чтобы облегчить работу в траншее с помощью техники) и откосы не более 1:1 (Engineering Field Manual, 1969).

В траншею укладывают водонепроницаемый грунт слоями толщиной 15—20 см, которые утрамбовывают, укатывают и при необходимости смачивают водой. Так поступают до тех пор, пока траншея не заполнится. Заполненная траншея и образует врезающийся в основание плотины зуб, или замок. Сопряжение водонепроницаемого замка с подстилающим водонепроницаемым слоем путем уплотнения предотвращает фильтрацию через проницаемый слой под

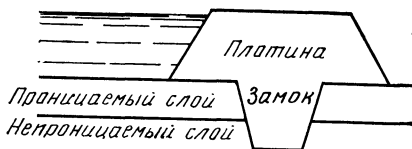


Рис. 12.1. Замок в основании плотины, построенной на водопроницаемом грунте с подстилающим водонепроницаемым слоем

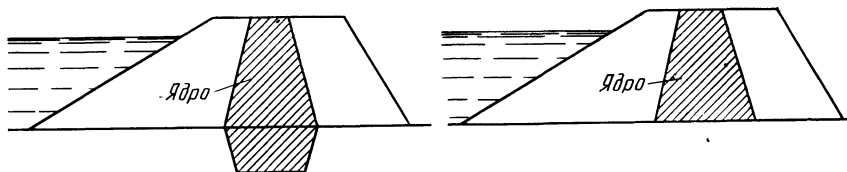


Рис. 12.2. Плотина с ядром из водонепроницаемого грунта для уменьшения фильтрации

плотиной. Построив замок, приступают к строительству плотины в том же порядке, как строился замок.

Если водонепроницаемого материала мало, можно применить другую конструкцию (рис. 12.2). Водонепроницаемое ядро доходит или почти доходит до самого гребня плотины и может быть как с врезкой, так и без врезки в основание. Поскольку из водонепроницаемого материала должно быть выполнено только ядро, остальная часть плотины может состоять из менее водонепроницаемого материала. Минимальный откос ядра составляет 1,5:1. ширина должна быть достаточной для уплотнения грунта с помощью имеющейся техники.

На рис. 12.3 показано устройство водонепроницаемой преграды при отсутствии водонепроницаемого грунта. Преграда имеет вертикальные стенки и выполняется из бетона, армированного листовой сталью, или другого прочного непроницаемого материала. Такая конструкция также может быть как с врезкой в основание, так и без нее, но обычно врезка необходима. Стоит такая конструкция обычно дороже, чем ядро из водонепроницаемого грунта, поэтому применяют ее только при отсутствии других приемлемых вариантов.

Ширина гребня. Имеются различные рекомендации по определению ширины гребня земляной плотины. Служба охраны и использования почв США рекомендует для плотин высотой менее 3 м ширину гребня не менее 2,4 м с увеличением ширины гребня для более высоких плотин в соответствии с табл. 12.1. Помимо данных, приведенных в табл. 12.1, Служба охраны и использования почв США назначает ширину гребня не менее 4,3 м для плотин,

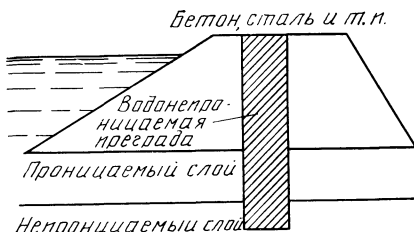


Рис. 12.3. Плотина с водонепроницаемой преградой

используемых для проезда, включая саму проезжую часть и обочины по обеим сторонам. При разведении сомика — кошки в прудах ширина гребня рекомендуется 3—3,7 м (Lee, 1973).

Фреверт и др. (Frevert et al., 1962) рекомендуют использовать уравнение (12.1) для определения ширины гребня плотин высотой 4,5 м и более. Они рекомендуют ширину гребня не менее

Т а б л и ц а 12.1. Минимальная ширина гребня по данным Службы охраны и использования почв США (Engineering Field Manual, 1969)

Высота дамбы, м	Ширина гребня, м
До 3	2,4
3—4,5	3
4,5—6	3,7
6—7,5	4,3

2,5 м для любой плотины и не менее 3,7, если гребень используется как дорога с обочиной шириной 0,6 м по обеим сторонам проезжей части:

$$W = 1,10(H)^{1/2} + 0,91, \quad (12.1)$$

где W — ширина гребня, м; H — высота плотины, м.

Таким образом, минимальная ширина гребня плотины (или дамбы) высотой 3 м и менее должна составлять 2,5 м и более. Если плотина используется как дорога для обеспечения доступа к прудам, ширина гребня должна быть не менее 3,7 м, лучше 4—4,5 м. Доступ к пруду желательно обеспечить хотя бы с одной стороны пруда, но лучше со всех сторон.

Боковые откосы. Откосы зависят от типа используемого грунта. Наиболее распространены откосы 3:1 (горизонталь к вертикали). Для высокоустойчивых грунтов это отношение можно уменьшить до 2,5:1 для верхового откоса и до 2:1 для низового. Для неустойчивых грунтов отношение может быть 4:1 и более. Верховой откос обычно выполняют более пологим, чем низовой. Поверхность верхового откоса намокает и подвергается воздействию волн, тогда как низовой откос большую часть времени остается сухим. Однако и низовой откос следует предохранять от эрозии.

Надводный откос. Надводный откос — это часть откоса, возвышающаяся над плотиной для предотвращения перелива воды через гребень. Высоту откоса можно определить как вертикальное расстояние от поверхности пруда, когда водосброс работает на его расчетной глубине, до гребня плотины после осадки. Высоту надводного откоса выбирают в соответствии с местными требованиями. Рекомендуются следующая высота надводного откоса (Ponds for Water Supply and Recreation, 1971): 0,3 м для прудов длиной до 200 м, 0,5 м для прудов длиной 200—400 м и не менее 0,6 м для прудов длиной 400—800 м.

Запас на осадку. При укладке плотины влагосодержание грунта следует довести до оптимального для получения максимальной плотности по Проктору. Чтобы обеспечить достаточное уплотнение, грунт укладывают слоями толщиной 15—20 см с тщательным уплотнением каждого слоя. Однако даже при соблюдении этого условия некоторая осадка все-таки неизбежна, поэтому необходи-

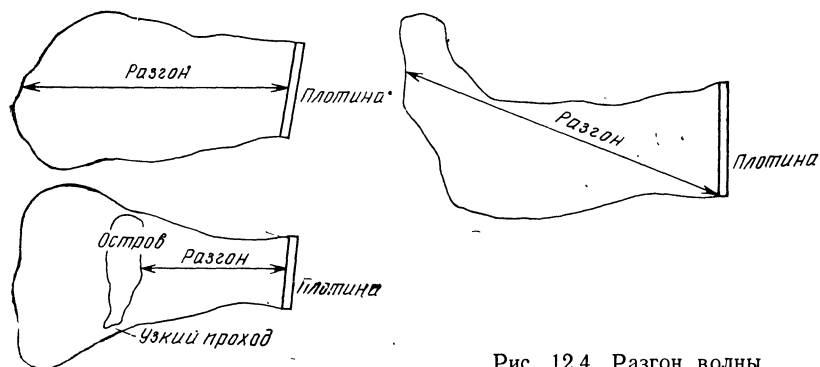


Рис. 12.4. Разгон волны

мо предусматривать запас на потерю высоты плотины. Величина его зависит от характера используемого для строительства плотины грунта, его влагосодержания и степени уплотнения во время строительства, скорости строительства и свойств материала основания. Запас на осадку обычно рассчитывают в процентах высоты плотины H . Он должен составлять не менее 5 % (Ponds for Water Supply and Recreation, 1971); при низком качестве строительных материалов и примитивных способах строительства предпочтителен запас до 10 %. При строительстве с помощью транспортера или канатного скребкового экскаватора без достаточного уплотнения запас должен составлять 20—25 % (Frevert et al., 1962).

Высота волны. Высота плотины должна быть достаточной для предотвращения волнового перелива через гребень. Высота волны зависит от разгона, т. е. расстояния по прямой от наиболее удаленной точки пруда до плотины. Если прямая линия, соединяющая наиболее удаленную точку пруда и плотину, проходит через препятствие, например остров, то разгон — это расстояние по прямой от плотины до ближайшей точки препятствия (рис. 12.4).

Высота волны связана с разгоном следующим уравнением (Frevert et al., 1962):

$$h_w = 1,014 (F)^{1/2}, \quad (12.2)$$

где F — разгон, м; h_w — высота волны, м.

Если не принять соответствующих мер, волны могут вызвать эрозию откосов плотины. Для защиты плотины часто применяют запони или крепление. Запонь представляет собой один или несколько рядов бревен, связанных между собой и закоренных примерно в 2 м перед откосами плотины. Бревна гасят энергию волн прежде, чем они достигают плотины (Ponds for Water Supply and Recreation, 1971).

Крепление состоит из камня, бетонных блоков или плит на откосах для защиты их от волнобоя. Камень необходимо укладывать на бермах, встроенных в откосы, чтобы крепление не соскальзывало. Площадь бермы покрывают слоем щебня толщиной 20—50 см,

а сверху помещают крепление. Щебень защищает грунт под креплением и вокруг него от волновой эрозии.

При слабом волнобое для защиты плотины выше уреза воды достаточно одерновки, которая является самым дешевым способом укрепления откосов.

Воздействие промерзания. При расчете высоты плотины следует учитывать также допуск на воздействие промерзания. Грунт до глубины промерзания подвергается воздействию сил вспучивания, расширения и сжатия в результате замерзания влаги. Замерзание и оттаивание разрыхляют грунт и делают его неустойчивым, поэтому высоту плотины следует увеличить на глубину промерзания, которая зависит от характера местности. При определении величины допуска следует учитывать местные условия.

Расчет высоты плотины. При расчете высоты плотины учитывают все перечисленные выше допуски. Высота воды у плотины колеблется в зависимости от характера местности, культивируемого вида и других факторов. Зная высоту воды, высоту плотины можно рассчитать по уравнению

$$H = h + h_w + h_F + h_s + h_{Fr}, \quad (12.3)$$

где H — высота плотины; h — высота воды; h_w — допуск на воздействие волн; h_F — допуск на надводный откос; h_s — допуск на осадку; h_{Fr} — допуск на промерзание.

При строительстве плотин в приливной зоне следует также учитывать приливы. Обваловка должна быть достаточно высокой для предотвращения перелива при сизигийных приливах и штормовых нагонах. Для большинства районов высоту сизигийных приливов можно определить по таблицам. Данные по штормовым нагонам, возможно, имеются в записях наблюдений, в противном случае штормовые нагоны для определенного района вычисляют по имеющимся данным.

Пример 12.1. Какова должна быть высота плотины для пруда с глубиной воды у плотины 2 м, если глубина промерзания составляет 0,3 м, разгон 100 м, а уплотнение при строительстве плотины выполняется при оптимальном влаго-содержании.

$$h = 2 \text{ м.}$$

По уравнению (12.2)

$$h_w = 0,014 (F)^{1/2};$$

$$h_w = 0,014 (100)^{1/2};$$

$$h_w = 0,14 \text{ м.}$$

Допуск на надводный откос h_F должен быть равен 0,3 м, поскольку разгон составляет 100 м (по рекомендациям Службы охраны и использования почв США).

Из-за слабого уплотнения в расчете принимают 10 %-ную осадку:

$$h_s = 0,1 \text{ м};$$

$$h_{Fr} = 0,3 \text{ м.}$$

Таким образом, из уравнения (12.3)

$$H = 2 + 0,14 + 0,3 + 0,1H + 0,3;$$

$$0,9H = 2,74;$$

$$H = 3,04 \text{ м.}$$

Водосбросные сооружения. Правильно спроектированный пруд имеет два водосбросных сооружения. Одно из них обеспечивает нормальный сброс воды и называется автоматическим водосбросом. Второе, предназначенное для обеспечения ливневого сброса, превышающего пропускную способность автоматического водосброса, является вспомогательным. В некоторых плотинах автоматический и вспомогательный водосбросы объединены в одно сооружение.

Автоматические водосбросы. Существует два основных типа автоматических водосбросов: сооружение с перепадом, являющееся секцией плотины, и сооружение с водоотводом через плотину и стояк. Сооружение с перепадом обычно используют для прудов, предназначенных для любительского рыболовства, и многоцелевых запруд (рис. 12.5). Такие сооружения непригодны для рыбоводных прудов, так как их основным недостатком является трудность, а иногда и невозможность полного спуска пруда. Можно встроить спускное устройство, но это удорожит стоимость пруда. Сооружение с перепадом представляет собой прямоугольный водослив с фиксированной высотой порога, поддерживающий постоянный уровень воды в запруде. Высота надводного откоса над порогом должна быть достаточной для пропуска максимальных ливневых стоков. Основным преимуществом такого водосброса является объединение в одном сооружении автоматического и вспомогательного водосбросов, что снижает стоимость строительства.

Водосброс второго типа состоит из стояка в верхнем бьефе и горизонтального водоотвода. Водоотвод соединен с нижней частью стояка и служит для отвода поступающей в стояк воды через плотину. Типичное устройство такого типа, состоящее из фиксированного стояка, верхняя часть которого контролирует уровень воды, и водоспуска с клапаном показано на рис. 12.6. Поскольку конец штока клапана находится над поверхностью воды, клапан можно открыть, когда пруд наполнен. Водоспуск позволяет полностью осушить пруд, поэтому он должен быть расположен в наиболее низком месте пруда. Кожух над верхней частью стояка предо-

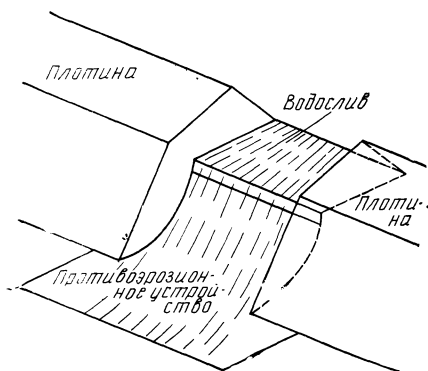
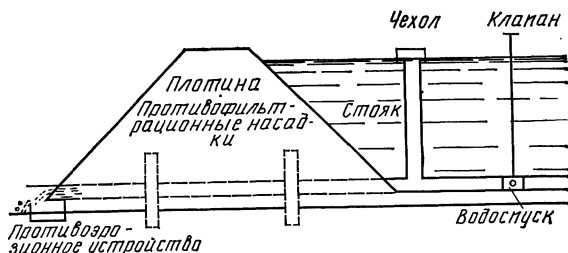


Рис. 12.5. Комбинированный водослив для поддержания постоянного уровня воды

Рис. 12.6. Автоматический водосброс со стояком и водоспуском



храняет его от засорения мусором. Регулируя глубину кожуха, можно выбрать уровень, на котором вода отводится из пруда. Эта высота будет влиять на концентрацию кислорода и температуру воды. При использовании водосброса такой конструкции следует принять меры к предотвращению сифонного эффекта, особенно если кожух подходит близко к дну пруда. На рис. 12.7 показан другой вариант устройства стояка и водоотвода, когда в стенке стояка устраивают щитки для регулирования уровня воды. Полный спуск пруда происходит при удалении всех щитков. Хьюет (Huet, 1970) называет такой тип стояка монахом. Сравнивая эти два варианта стояков, он отдает предпочтение устройству, показанному на рис. 12.6. При использовании монаха сбрасываются верхние слои воды. Убрать нижние щитки трудно, пока пруд не будет спущен хотя бы частично. В связи с этим, если рыбу отлавливают ниже плотины, она должна пройти через перепад в монахе до того, как убраны самые нижние щитки. Это может увеличить потери рыбы в результате травмирования. Если пруд облавливают неводом, то у монаха есть определенные преимущества.

Размеры горизонтальной отводной трубы должны обеспечивать пропуск нормального стока из пруда. На объем нормального сброса влияют местное водоснабжение, размеры и конструкция пруда, а также климатические условия. Поскольку автоматический водосброс является и водоспуском пруда, размер труб часто определяется объемом потока, необходимым для обеспечения понижения уровня за достаточно короткое время. Если рыбу выбирают из рыбосборника неводом, спуск пруда до желаемого уровня должен

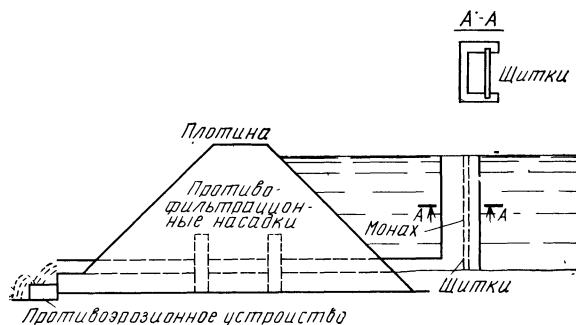


Рис. 12.7. Автоматический водосброс со стояком-монахом

быть достаточно быстрым, чтобы в результате недостатка кислорода рыба в рыбосборнике не погибла. Диаметр стояка не должен быть менее 20 см, а диаметр горизонтальной трубы — менее 15 см.

Автоматические водосбросы выполняются из разных материалов. Можно использовать трубы из гофрированного металла и другие гибкие водоводы, если их укладывать в хорошо уплотненный водонепроницаемый грунт. Жесткие трубы из бетона, чугуна и асбоцемента следует укладывать на опалубку из бетона, которая наполовину охватывает трубу. Бетон поддерживает трубу и предохраняет от поломок водовод из-за усадки или перегрузки плотины. При выборе типа водовода учитывается срок службы и устойчивость по отношению к осадке и нагрузкам.

Водоводы, проходящие через плотину, обкладывают тонкими, плотно утрамбованными слоями высокосортового заполняющего материала. Если в наличии имеется только высокопроницаемый материал, следует установить противофильтрационные устройства, которые представляют собой металлические или бетонные насадки, туго посаженные на водоотводную трубу под прямым углом к ее оси и радиально отходящие от нее наружу. Благодаря этим насадкам вода, просачивающаяся вдоль внешней поверхности водоотводящей трубы, проходит большее расстояние, чем без насадок. Увеличение расстояния повышает сопротивление потоку и уменьшает просачивание вдоль внешней стороны трубы, что предотвращает вымывание окружающего трубу заполняющего материала. Насадки можно считать эффективными, если они увеличивают путь потока не менее чем на 20% (Frevert et al., 1962). Для увеличения пути потока на одном водоотводе можно использовать одну или несколько насадок. Если насадки выполнены из бетона, весь формовочный материал должен быть с них удален до начала строительства плотины, в противном случае он со временем начнет гнить и образуются пустоты, в результате чего насадки перестанут быть эффективными.

Все стыки в трубах необходимо тщательно уплотнять. При использовании бетона или раствора следует произвести засыпку и утрамбовку грунта (не менее 1,25 м) над водоотводной трубой до затвердевания бетона или раствора, чтобы предотвратить образование трещин в стыках во время засыпки. Засыпать и утрамбовывать грунт над водоотводом следует вручную, только после этого можно будет использовать тяжелую строительную технику.

Вспомогательный водосброс. Вспомогательные водосбросы предназначены для пропуска максимального ливневого стока воды. Обычно выходы автоматических водосбросов и первоначальный сток через вспомогательный водосброс имеют разные высотные отметки, причем разница в отметках зависит от конструкции пруда. Эта разница, умноженная на площадь поверхности пруда, представляет собой временный аккумулированный объем пруда. Пропускная способность вспомогательного водосброса равна отношению временного аккумулированного объема к расчетному объему ливневого стока. Если это отношение составляет 0,3:1 или

менее, вспомогательный водосброс должен обеспечивать пропуск всего ливневого стока. При отношениях 0,3:1—0,7:1 пропускная способность составляет от 86% вероятного максимального стока для первого отношения и до 40% для второго (Frevet et al., 1962).

Самым распространенным типом вспомогательного водосброса является открытый одернованный канал трапецевидного сечения. Зная пропускную способность, канал можно рассчитать по формуле Маннинга [уравнение (9.49)]. Участок, регулирующий сток, должен соответствовать техническим условиям открытого канала, однако ширину входной и выходной частей следует постепенно увеличивать, чтобы на концах она превышала ширину регулирующего сток участка не менее чем на 25%. Это обеспечивает снижение потерь на входе и выходе. Уклон на входе должен быть не менее 2% к пруду, что предотвращает образование луж при перепаде уровня воды. Выходная часть должна иметь достаточный уклон от пруда для предотвращения образования луж после водосброса.

Боковые откосы следует выполнять с уклоном, рекомендуемым для данного типа грунта, но не круче 2:1 (горизонталь к вертикали). Канал устраивают в обход плотины и по возможности в грунте с ненарушенной структурой. В большинстве случаев расчетная глубина потока в канале не превышает 0,3 м (Frevet et al., 1962). По окончании строительства канала обеспечивают надежный растительный покров. Конец сбросного канала располагают значительно ниже плотины и защищают от эрозии.

Вспомогательный сбросной канал следует использовать только для пропуска ливневых стоков. Растительный покров не удержится в канале, если он большую часть времени будет сырым. Не защищенный растительностью канал подвергнется эрозии, а это первый шаг к разрушению канала, да и плотины.

Уход за плотиной. Дерновое покрытие требует удобрения и ухода. Необходимо проводить регулярный осмотр плотины через небольшие промежутки времени для своевременного обнаружения эрозии и других повреждений. Серьезный вред плотине могут причинить ондатры и другие роющие водные животные, которых необходимо отлавливать. Для борьбы с вредителями используются также проволочные сетки, устанавливаемые по берегам прудов. Правда, если плотина достаточно широка, животные не прорывают ходы насквозь и не вызывают потерь воды. Проход и проезд по плотине следует ограничить, так как нарушение дернового покрытия способствует началу эрозии.

Меры борьбы с фильтрацией. В некоторых случаях пруды приходится строить на проницаемом грунте. Если не принять мер для снижения потерь на просачивание, потребности в воде возрастают. Для предотвращения фильтрации в прудах используют уплотнение грунта, глиняный покров, бентонит, химические добавки и водонепроницаемую облицовку. Эффективность этих способов зависит от определенных условий, основным из которых

является отношение доли крупнозернистого песка и гравия к доле мелкозернистой глины и ила в грунте.

Уплотнение. Иногда для обеспечения водонепроницаемости пруда достаточно одного уплотнения. Этот способ наиболее дешевый, но предъявляет самые строгие требования к грунту (от крупного песка до тонкодисперсной глины, причем глины должно быть не менее 10 %). Помимо этого ограничения в отношении размера частиц грунта метод уплотнения обычно не дает удовлетворительных результатов при больших глубинах.

Начинать следует с удаления с площади пруда всей растительности. Затем ямы, трещины и другие углубления засыпают непроницаемым материалом и грунт разрыхляют до глубины 20—25 см (Ponds for Water Supply and Recreation, 1971) с помощью почвофрезы, дисковой бороны или другой аналогичной техники. Камни, корни и другие посторонние материалы удаляют, влагосодержание грунта должно обеспечивать оптимальное уплотнение. Грунт уплотняют четырьмя — шестью проходами катка.

Толщина уплотненного слоя должна составлять не менее 20 см для глубин 3 м и менее. Для глубин, превышающих 3 м, высоту уплотненного слоя следует увеличивать пропорционально увеличению глубины пруда. Если необходимо уплотнить грунт на глубину более 20 см, уплотнение следует выполнять послойно, причем толщина каждого уплотненного слоя не должна превышать 20 см (Ponds for Water Supply and Recreation, 1971).

Глиняный покров. Фильтрацию прудов, сооружаемых на крупнозернистых грунтах, не содержащих достаточного количества глины, можно предотвратить путем укладки слоя (покрова) хорошо отсортированного крупнообломочного материала, содержащего не менее 20% глины. Таким слоем следует покрыть дно и откосы пруда, по крайней мере, до предполагаемого уровня воды. Толщина покрова должна быть не менее 30 см для глубин до 3 м, с увеличением примерно на 5 см для каждой последующих 30 см при глубине свыше 3 м (Engineering Field Manual, 1969).

Технология устройства покрова идентична описанной технологии уплотнения. Весь посторонний материал, т. е. камни, корни деревьев и растительность, следует удалить. Покров укладывают слоями толщиной 20 см или менее и уплотняют до укладки следующего слоя.

Содержание глины в покровном материале достаточно высоко, поэтому при смачивании и высушивании могут образовываться трещины, что приводит к образованию в покрове борозд и углублений. Замерзание и оттаивание также могут привести к разрушению покрова. Для предотвращения разрушения покров засыпают слоем гравия толщиной 30—45 см (Ponds for Water Supply and Recreation, 1971). Участки дна и откосов, где из-за стоков и других устройств скорость течения высока, нуждаются в особой защите для предотвращения эрозии покрова.

Бентонит. Иногда для обеспечения непроницаемости в крупнозернистый грунт добавляют бентонит — мелкозернистую коллоид-

ную глину. Во влажном состоянии бентонит поглощает воду, которая по весу в несколько раз превышает его собственный вес и разбухает до объема, превышающего его первоначальный объем в 8—20 раз. Бентонит, добавленный в крупнозернистый грунт, разбухает при смачивании, заполняет поры грунта и обеспечивает его непроницаемость. Однако, поскольку объем бентонита при высыхании уменьшается, он не является достаточно надежным материалом для обеспечения непроницаемости в прудах с большими колебаниями уровня воды. Для рыбоводных прудов, которые периодически полностью осушаются, бентонит следует применять с большой осторожностью.

Подготовка прудов к покрытию бентонитом начинается с удаления всей растительности и заполнения углублений крупным гравием и другим подходящим заполнителем. Заполнитель следует уплотнить. Предварительно необходимо провести лабораторный анализ грунта пруда для определения эффективности применения бентонита и его количества. Принимая решение об использовании бентонита, следует также выявить источник снабжения бентонитом и стоимость его перевозки к месту строительства пруда. Транспортные расходы могут настолько повысить стоимость бентонита, что от него придется отказаться.

Если все же решено применять бентонит для создания непроницаемости прудов, необходимо увлажнить грунт до состояния, обеспечивающего оптимальное уплотнение, и равномерно распределить бентонит на подготовленном дне и откосах пруда в количестве, определенном путем лабораторного анализа. Обычно оно составляет от 5 до 15 кг/м² (Ponds for Water Supply and Recreation, 1971). Грунт и бентонит тщательно перемешивают с помощью почвофрезы или другого механизма, и перемешанный слой уплотняют четырьмя — шестью проходами катка. Если до наполнения пруда остается еще довольно много времени, во избежание потери влаги перемешанный слой укрывают соломой, сеном или другим подходящим материалом, который прижимают одним проходом катка. Участки пруда с высокими скоростями течения воды могут потребовать каменной наброски или других укреплений для предупреждения эрозии.

Химические добавки. Грунты с высоким процентным содержанием мелкозернистой глины и ила иногда образуют агрегаты из-за сцепления частиц. Агрегированные частицы ведут себя как крупные частицы, грунт становится пористым. Разрушение связей между частицами восстанавливает их первоначальный размер, и, поскольку эти частицы очень малы, проницаемость грунта уменьшается.

Одним из способов разрушения агрегатов является добавление химических веществ, называемых диспергентами, из которых наиболее широкое распространение получили полифосфат натрия и хлористый натрий (столовая соль). Из полифосфатов натрия наиболее эффективными являются тетрапирофосфат и триполифосфат натрия. Можно использовать также техническую кальцинирован-

ную соду, на 99—100% состоящую из углекислого натрия. Полифосфаты натрия применяются в количестве 4,5—10 кг/м², хлористый натрий—20—32 кг/м² и кальцинированная сода—9,7—19,4 кг/м². Однако до выбора диспергента и определения его количества необходимо провести лабораторный анализ грунта. Применение диспергентов для рыбоводных прудов требует учета влияния химического вещества на рыбу. Оно должно быть нетоксичным и невыщелачиваемым.

Подготовка пруда заключается в удалении всей растительности с его площади. Обнажения коренных пород и другие потенциально проницаемые участки покрывают слоем мелкозернистого материала толщиной 60—90 см. На участках с крупнозернистым известняком эффективность мер по обеспечению непроницаемости будет зависеть от устойчивости грунтового слоя, поэтому уплотнение этого слоя является необходимым условием.

Диспергент должен быть мелкогранулированным, так чтобы не менее 95% гранул проходило через сито № 30 и менее 5% через сито № 100 (Ponds for Water Supply and Recreation, 1971). Диспергент распределяют по площади пруда в количестве, определенном лабораторным анализом, и тщательно перемешивают с грунтом с помощью почвофрезы или другого механизма. Затем перемешанный слой с оптимальным влагосодержанием уплотняют четырьмя—шестью проходами катка. Если необходим водонепроницаемый слой толщиной более 15 см, его укладывают отдельными слоями по 15 см, причем каждый слой обрабатывают указанным выше способом. Участки, где возможно механическое нарушение непроницаемого слоя, необходимо защищать. Слой гравия толщиной 30—45 см поверх непроницаемого слоя обычно обеспечивает достаточную защиту на наиболее опасных участках (например, на уровне полной воды).

Водонепроницаемая облицовка. В качестве облицовок для прудов широкое применение находят такие водонепроницаемые материалы, как полиэтилен, винил и бутилкаучук. Эти облицовки сводят потери на просачивание практически к нулю, если, конечно, они не имеют разрывов и проколов. Они обеспечивают более надежную водонепроницаемость, чем бентонит и уплотнение грунта, но во многих случаях их применение сдерживается стоимостью.

Черная полиэтиленовая пленка дешевле, чем винил и бутилкаучук, и более износоустойчива, чем винил. Винил обладает большим сопротивлением удару, чем полиэтилен, и его легко залатать или склеить с помощью растворителя. Полиэтилен можно соединять нагреванием, с помощью специального клея или изоляционной ленты. Бутилкаучук соединяют и латают с помощью специального клея.

Полиэтилен и винил необходимо защищать от механических повреждений грунтовым покрытием. Полиэтиленовую или виниловую пленку покрывают слоем мелкозернистого незасоренного грунта (т. е. без камней, палок и т. п.) толщиной не менее 15 см. Такой же слой грунта укладывают под пленку, если есть опасность

ее повреждения острыми предметами. Выстилку бутилкаучуком можно делать и без грунтового покрытия, за исключением участков прохода людей и скота и проезда техники. На таких участках необходимо грунтовое покрытие толщиной 20—25 см, причем материал нижнего слоя толщиной 7,5 см должен быть не крупнее пылеватого песка.

На грунтах не крупнее чистого или пылеватого песка рекомендуется применять пленку толщиной не менее 0,20 мм для полиэтилена и 0,38 мм для бутилкаучука, а на грунтах чистогравийных и гравийных с примесью глины или ила толщина пленки должна быть не менее 0,38 мм для полиэтилена или винила и 0,76 мм для бутилкаучука (Engineering Field Manual, 1969).

Подробные технические условия герметизации пленок приведены в пособии, изданном Службой охраны и использования почв США (National Engineering Handbook, Section 2, Part 1, Standard, 358).

Участок пруда очищают от растительности, все углубления заполняют, камни, корни и другие предметы, которые могут проколоть или прорвать пленку, удаляют. Там, где это необходимо, пленку укладывают на подушку из слоя мелкозернистого материала. Грунт под пленкой должен быть достаточно сухим для прохода и проезда рабочих и техники. Там, где пленку выстилают без грунтового покрытия, откосы не должны превышать 1:1, там же, где пленку выстилают с последующим грунтовым покрытием, откос не должен превышать 3:1 (горизонталь к вертикали), в противном случае грунтовое покрытие будет соскальзывать с пленки. После окончания всех подготовительных работ пленку выстилают на дне и откосах пруда.

Некоторые растения прорастают через виниловую и полиэтиленовую пленку, поэтому желательно грунт стерилизовать. В продаже имеется несколько химических препаратов — стерилизаторов почвы. При применении бутилкаучука толщиной более 0,5 мм в стерилизации нет необходимости.

Виниловую и бутилкаучуковую пленку следует выстлать ровно, но без натяжки; полиэтиленовая пленка требует припуска до 10 % (Ponds for Water Supply and Recreation, 1971). Полосы пленки соединяют внахлест с перекрытием 15 см. Края выстилки, которые должны выходить за отметку полной воды, заделывают в траншеи шириной 20—25 см и глубиной 30 см, вырываемые вдоль откосов пруда так, чтобы на дне траншеи оставалось 20—25 см пленки. Траншеи снова заполняют грунтом и грунт уплотняют. Защитный слой грунта, там где он необходим, укладывают поверх пленки осторожно, чтобы ее не повредить. При работах с пленкой следует придерживаться рекомендаций завода-изготовителя.

Копаные пруды. Копаные пруды строят путем извлечения грунта и заполнения образующегося углубления водой. Копаные пруды, за исключением вырытых ниже уровня грунтовых вод и подпитываемых грунтовыми водами, следует облицовывать материалом с низкой проницаемостью. Дно прудов, подпитываемых грунтовыми

водами или врезаемых непосредственно в водоносный слой, должно состоять из проницаемого материала, чтобы вода могла попадать в пруд.

Копанный пруд может иметь любую форму, но наиболее распространенной является прямоугольная, так как такой пруд легче выкопать с помощью землеройной техники. Размер пруда часто ограничивается стоимостью землеройных работ. Зато такие пруды можно сооружать на равнинной местности, характерной для многих береговых участков.

Копаные пруды, используемые в рыбоводстве, имеют некоторые недостатки. Высокий уровень грунтовых вод обычно характерен для болот или прибрежных участков, поэтому часто необходима принудительная подача воды в пруд. При отсутствии дамбы при полной воде пруд может оказаться затопленным, что приведет к полной потере выращиваемой рыбы или вселению нежелательных видов. Могут также потребоваться дополнительные расходы на насосные установки для замены части воды и удаления осевших фекалий и на механическую аэрацию для поддержания на требуемом уровне содержания растворенного кислорода. Облов копаного пруда затруднителен, так как спустить его можно только с помощью насоса.

ВЫРОСТНЫЕ КАНАЛЫ

Выростные каналы представляют собой длинные узкие прямоугольные пруды, обычно довольно неглубокие (не более 1—2 м), через которые протекает значительный объем воды. Поскольку выростные каналы — это проточная система, плотность посадки в них может быть значительно выше, чем в прудах, что позволяет получать больше рыбы с меньшей площади. Кроме того, в выростных каналах легче, чем в прудах, бороться с заболеваниями, кормить и отлавливать рыбу.

Строить и содержать выростные каналы почти так же просто, как и пруды. Однако выростные каналы требуют больших расходов воды, особенно если они расположены параллельно. Последовательное расположение каналов снижает потребности в воде, но при этом в каналах или между ними необходимо иметь установки для насыщения воды кислородом. Кроме того, продукты обмена из всех вышерасположенных каналов проходят через последний канал в ряду, что приводит к снижению продукции на канал и вызывает необходимость уменьшения числа каналов или увеличения расхода воды.

Типичный пример последовательного расположения каналов показан на рис. 12.8. Выпускное отверстие одного канала является впускным отверстием следующего. Обычно каналы располагают на разных уровнях, и энергия падающей воды обеспечивает аэрацию. Необходимый перепад высот составляет от 0,3 до 1,0 м в зависимости от скорости потока, интенсивности кормления, объекта культивирования и других факторов. Последовательное распо-

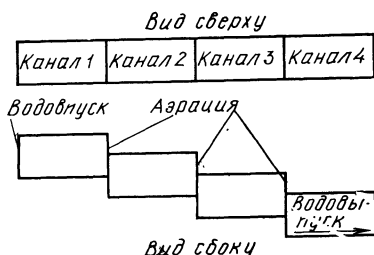


Рис. 12.8. Последовательное расположение выростных каналов

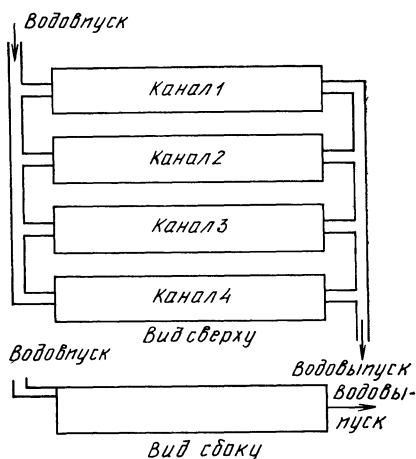


Рис. 12.9. Параллельное расположение выростных каналов

ложение каналов на местности с пологим уклоном снижает стоимость строительства и в то же время обеспечивает необходимую потерю напора. При наличии в каждом канале механической аэрации потеря напора может быть почти равна нулю, но механическая аэрация увеличивает эксплуатационные расходы.

При параллельном расположении выростных каналов (рис. 12.9) потеря напора, накопление продуктов обмена и необходимость в аэрации сводятся к минимуму. Однако расход воды прямо пропорционален числу каналов. Если требуется насосная установка, это увеличивает эксплуатационные расходы, а для систем с однократным использованием воды (полузамкнутых) необходим более мощный источник воды.

Каналы широко применяются на рыбоводных заводах, так как проточность сводит к минимуму проблемы, связанные с концентрацией продуктов обмена и недостатком кислорода, и, что еще важнее, заставляет рыбу плавать. Выживаемость заводской молоди в естественных условиях выше, если при выращивании на заводе она была вынуждена активно двигаться. Небольшая глубина воды в каналах позволяет визуально наблюдать за поведением рыбы. При возникновении заболевания поступление воды в соответствующий канал перекрывают, проводят лечебные мероприятия и затем канал промывают. Поскольку каналы редко бывают шире 6—7 м, раздача корма не вызывает больших затруднений.

Выростные каналы в большинстве случаев бывают земляные или бетонные, хотя применяют также пластмассы и другие материалы. Выростные каналы рассчитывают по формулам для открытых каналов. Скорость потока в выростных каналах колеблется в широких пределах и зависит от вида рыбы, плотности посадки, интенсивности кормления, температуры, источника водоснабжения

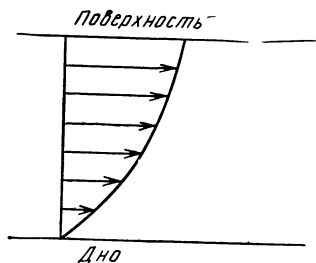


Рис. 12.10. Профиль скорости в выростном канале

и других факторов. Скорость потока может быть обусловлена потреблением и наличием кислорода или концентрацией аммиака. Параметр, значение которого первым становится критическим, определяет либо плотность посадки, либо скорость потока. Разумеется, существует максимальная скорость потока для рыбы, которая зависит от ее вида, физического состояния и размера. Для самоочищения каналов, а это означает значительную экономию трудовых затрат, необходима минимальная скорость потока, которая для лосося составляет 0,24—0,3 м/с (Burrows and Chenoweth, 1955). Скорость потока 0,15 м/с оказалась недостаточной, чтобы большая часть выделений устриц оставалась во взвешенном состоянии. Бэрроуз и Ченовет (Burrows and Chenoweth, 1970) указывают, что при скоростях потока, достаточных для самоочищения выростного канала или бассейна, рыба небольших размеров не способна противостоять току воды и удерживаться на месте. Таким образом, самоочищение каналов или бассейнов — трудная задача.

Конструкция входного и выходного отверстий и самого выростного канала должна по возможности обеспечивать поток, максимально приближенный к течению со структурным ядром, т. е. такому, в котором все элементы воды движутся с одинаковой горизонтальной скоростью. Из-за стационарного пограничного слоя у стенок канала идеальное течение со структурным ядром невозможно. Скорости в выростном канале, как и в любом другом открытом канале, имеют параболическое распределение в вертикальной плоскости. Максимальная скорость воды наблюдается вблизи свободной поверхности, в то время как у дна скорость в пограничном слое снижается до нуля (рис. 12.10). Таким образом, в выростном канале течение со структурным ядром обеспечить невозможно, но для предотвращения оседания твердых частиц оно должно быть максимально к нему приближено. Например, частица, оседающая вертикально в горизонтальном скоростном профиле (см. рис. 12.10), осядет на 0,3 м ближе при горизонтальном перемещении, если она находится вблизи дна, по сравнению с частицей, которая находится вблизи поверхности. Кроме того, по мере приближения частицы к дну скорость может уменьшиться до величины ниже той, которая необходима для удержания частицы во взвешенном состоянии.

Отсутствие течения со структурным ядром в выростном канале приводит к образованию «мертвых зон» (т. е. участков с ограниченным водообменом), в которых наблюдается недостаток кислорода. Дефицит кислорода увеличивается в результате концентрации отходов и продуктов обмена веществ на участках со сравнительно низкими скоростями течения. Поскольку в выростных ка-

налах рыбы обычно много, она часто не способна избегать этих «мертвых зон», что приводит к ее гибели. Возрастает также опасность заболеваний рыбы.

БАССЕЙНЫ

Разница между бассейнами и прудами заключается главным образом в размерах и строительном материале. Пруды крупнее, и, как правило, строятся из земли, а бассейны меньше и выполнены из бетона, стекловолокна и других подходящих материалов. Для культивирования водных организмов используют разнообразные резервуары: от домашних аквариумов до овальных бассейнов длиной по большой оси около 30,5 м. Идеальный бассейн для разведения водных организмов должен иметь следующие характеристики: внутренняя поверхность должна быть гладкой, чтобы при соприкосновении с ней рыба не получала повреждений; бассейн должен быть самоочищающимся; вода в нем должна быть хорошего качества; бассейн должен быть прочным, чтобы его можно было перемещать; бассейн должен быть доступен для чистки и стерилизации; внутренняя поверхность не должна быть токсичной для выращиваемого организма и не должна способствовать внедрению болезнетворных организмов; бассейн должен быть по возможности недорогим; бассейн не должен быть подвержен коррозии.

Строительные материалы. Для сооружения крупных бассейнов широко используют бетон. Бетон — износостойчивый, недорогой материал, которому легко придать желаемую форму, но он тяжел, поэтому в большинстве случаев бетонные бассейны являются стационарными сооружениями, или в крайнем случае их можно передвинуть лишь с помощью специальной техники. Внутренняя поверхность бетонных бассейнов может быть довольно гладкой, но без специального покрытия почти невозможно сделать ее достаточно непроницаемой для облегчения стерилизации. Таким образом, бетонные бассейны без покрытий не годятся для очистки ракообразных и моллюсков. В таких случаях применяют эпоксидные или другие подобные покрытия. Для большинства рыбоводных работ можно использовать бетонные бассейны без покрытий. При использовании в системах с ограниченным потоком воды (например, декоративные бассейны) бетон имеет еще один недостаток. Поскольку бетон характеризуется высоким содержанием карбоната кальция, рН воды в новых сооружениях часто бывает высоким, поэтому до использования бассейна его необходимо тщательно промыть струей воды под напором, что обычно снижает рН.

Бассейны выполняют также и из дерева. Дерево — один из наиболее дешевых материалов, но для предотвращения гниения деревянные бассейны требуют покрытия. На рис. 12.11 показан небольшой фанерный бассейн с эпоксидным покрытием для выращивания рыбы в замкнутой системе. Такие бассейны выполняют из фанеры толщиной 1,3 или 1,6 см и укрепляют деревянными брусками размером 5×10 см с двух- или трехслойным эпоксидным

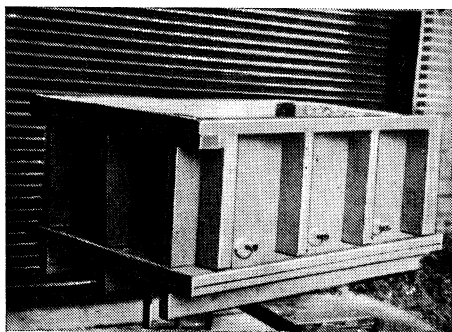


Рис. 12.11. Фанерный бассейн с эпоксидным покрытием

покрытием. Деревянные бруски расположены по верхнему и нижнему периметру бассейна, между ними закрепляют вертикальные бруски на расстоянии около 30 см друг от друга для бассейна глубиной 1 м. Расстояние между вертикальными брусками зависит от глубины воды в бассейне и от толщины фанеры: оно увеличивается с уменьшением глубины бассейна и увеличением толщины фанеры. Если бассейн не предполагается устанавливать на проч-

ном фундаменте без дальнейшего передвижения, его дно должно быть укреплено. Весь бассейн должен иметь эпоксидное или другое нетоксичное покрытие. Покрытие внешней поверхности бассейна предотвращает медленное гниение дерева в результате высокой влажности и попадания водяных брызг и является обязательным в случае использования низкокачественной фанеры. Использование высококачественной или судовой фанеры устраняет необходимость покрытия внешней поверхности, но следует учитывать, что покрытие внешней поверхности удлинит срок службы бассейна. Внутренняя поверхность бассейна должна быть покрыта, по меньшей мере, одним слоем защитного материала (число слоев зависит от материала покрытия и назначения бассейна).

Бруски под дном бассейна являются опорами, а также позволяют подводить захваты вилчатого автопогрузчика под бассейн, что облегчает его перемещение. Хотя некоторые бассейны можно передвигать и в наполненном состоянии, риск их повреждения уменьшается, если перед перемещением бассейны опорожняют.

Бассейн, показанный на рис. 12.11, слишком тяжел, так как глубина его всего 0,6 м. Примерно такую же конструкцию применяют для бассейнов глубиной, по крайней мере, до 1,25 м. Для бассейнов длиной более 2,5 м необходимы более утяжеленные верхние и нижние элементы конструкции или опоры по центру этих элементов.

Рассмотрение конструкций бассейнов не входит в круг вопросов, обсуждаемых в данной книге. Однако необходимо отметить, что напряжения в элементах конструкций фанерных бассейнов с эпоксидным покрытием не должны быть равны допускаемым напряжениям. Необходимо свести к минимуму натяжение, так как для многих защитных материалов характерна высокая хрупкость. Натяжение или изгиб стенок бассейна под нагрузкой может вызвать образование трещин в эпоксидных покрытиях и, следовательно, утечку воды, которая не только просто нежелательна, но и может привести к гибели рыбы. Даже если вода и не будет про-

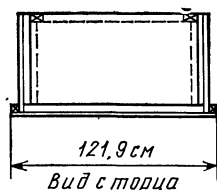
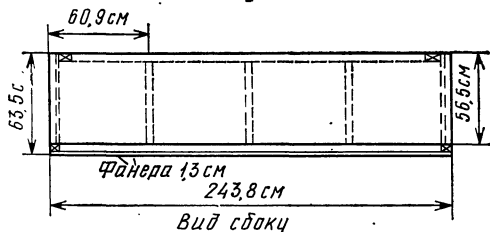
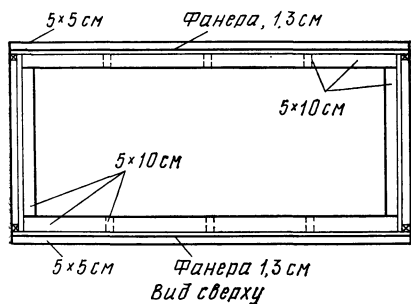


Рис. 12.12. Фанерный бассейн с покрытием глубиной до 0,6 м. Фанера покрыта составом «Боат armor» («Валспар марин») и выкрашена темной краской

текать, она попадет на фанеру, которая начнет гнить, так что в конце концов бассейн выйдет из строя.

Фанерный бассейн другой конструкции (рис. 12.12) дешевле первого, но требует более эластичного покрытия и не выдерживает грубого обращения, какому можно подвергать бассейн, показанный на рис. 12.11. В этой конструкции материалы находятся ближе к предельному напряжению и натяжение больше. Такая конструкция не рекомендуется для бассейнов глубиной свыше 0,6 м и размером более $1,25 \times 2,5$ м.

Пластмассовые бассейны. Под термином «пластмасса» здесь подразумевается несколько материалов, в том числе стекловолокно, полипропилен, полиэтилен, винил, акрил и др. Каждый из них обладает определенными свойствами, делающими его подходящим для применения в конкретных случаях, однако все пластмассы имеют и много общего, что позволяет объединить их в одну группу. По-видимому, стекловолокно чаще других пластмасс применяется для строительства рыболовных бассейнов. Это — легкий, прочный и недорогой материал, инертный по отношению к пресной и соленой воде и легко принимающий почти любую форму, хотя бассейны из стекловолокна чаще всего бывают круглыми. Стекловолокно характеризуется наибольшей сопротивляемостью растяжению, а это именно то усилие, которое испытывают стенки круглого бассейна.

Литые бассейны из стекловолокна могут иметь участки шероховатой поверхности, которые необходимо полностью покрыть смолой. Эти участки состоят из очень тонких, острых кусочков стекла, которые могут попасть в жабры или органы пищеварения животных и вызвать обширные повреждения тканей или внутреннее кровоотечение.

Винил представляет собой эластичную пластмассу, которую часто используют для облицовки плавательных бассейнов и в других случаях, когда требуется гибкость и почти полная водонепроницаемость. В рыбоводстве иногда используют детские ванночки для разведения или содержания рыбы. В большинстве случаев они выполнены из винила. Поскольку винил гнется, стенки бассейна необходимо удерживать в вертикальном положении. В небольших бассейнах жесткость обеспечивается надувными круглыми секциями бассейна. Бассейн крупных размеров требует более жестких опор, которые у промышленных бассейнов обычно выполнены из стали. Гибкость винила позволяет облицовке принимать форму, соответствующую форме внешней опоры, при условии, что опора выполнена из гладкого материала. Поскольку винил легко прокалывается и режется, необходимо тщательно следить за тем, чтобы облицовка не соприкасалась с острыми поверхностями. Как облицовочный материал для рыбоводных прудов винил имеет несколько достоинств. Это сравнительно недорогой гладкий (что важно для предотвращения повреждений рыбы) и легко очищаемый материал. Однако если он не чрезмерно толстый, то требует очень большой осторожности в обращении, так как его легко повредить. Детские ванночки для купания часто идеально подходят для экспериментов, так как они дешевы, их легко купить и хранить. К сожалению, их срок службы непродолжителен.

Винил применяют также для облицовки прудов, выполненных из пронизываемого грунта. При наличии песчаной подушки под винилом и защитного слоя песка винил обеспечивает длительный срок службы. Тем не менее для облицовки прудов чаще используют резину и другие пластмассовые материалы. При выборе материала для защитного покрытия прудов учитывают также такие факторы, как стоимость, условия эксплуатации и их наличие.

Полиэтилен по своим свойствам сходен с винилом, но менее эластичен. Его широко используют для облицовки недорогих жестких сооружений. Он продается в рулонах. Полиэтилен имеет разную толщину, выбор ее зависит от условий использования.

Акриловые материалы широко используются в рыбоводстве для экспериментальных целей. Акриловый плексиглас толщиной до 0,35 см обладает ограниченной эластичностью, а более толстый почти жесткий. Для проведения экспериментов применяют прозрачную акриловую пластмассу, которая позволяет осуществлять визуальные наблюдения. Продается также цветная акриловая пластмасса. Акрил поддается сверлению и обработке на станках для придания ему желаемых формы и размера. При изготовлении аквариумов это означает, что водоподводящие и отводящие трубы, краны и т. п. можно ввинчивать прямо в пластмассу, что невозможно для стеклянных аквариумов. Акриловая пластмасса не раскалывается, как стекло, но поскольку она гораздо мягче, на ней сравнительно легко образуются царапины. Акриловую пластмассу соединяют с помощью растворителя (для некоторых акриловых пластмасс подходит дихлорэтан) и специального клея.

Акриловые пластмассы инертны по отношению к пресной и соленой воде, однако они несколько разбухают в условиях высокой влажности. Это вызывает сложности, когда одна сторона большого акрилового листа находится в условиях высокой, а другая — в условиях гораздо более низкой влажности воздуха. Из-за перепада влажности лист может покоробиться, а при наличии стяжек и они, и сама пластмасса могут оказаться в условиях сильного напряжения. Некоторые акриловые пластмассы легче деформируются, чем другие, поэтому при выборе материала для эксплуатации в таких условиях необходимо ознакомиться с его спецификацией. Интересно, что погружение одной стороны пластмассового листа в воду не вызывает подобного явления. Для сооружения рыбоводных бассейнов акриловые пластмассы слишком дороги и могут иметь лишь ограниченное применение.

Полипропиленовые бассейны изготавливаются различных размеров вместимостью до 1500 л. По специальному заказу могут быть изготовлены и более крупные бассейны. Большие бассейны из пропилена дороже, чем такие же бассейны из стекловолокна. В случае использования пропилена необходимо механическое крепление арматуры, так как приклеивание затруднительно, если вообще возможно. Полипропилен также инертен по отношению как к пресной, так и к морской воде.

Для изготовления бассейнов можно использовать и поливинилхлорид (ПВХ), но для всех бассейнов, кроме самых небольших, необходимы конструктивные опоры. ПВХ соединяют с помощью клея или нагреванием. Его используют главным образом не для бассейнов, а для труб в системах с морской водой. Для этой цели он — самый дешевый материал. ПВХ инертен как к пресной, так и к соленой воде.

Для изготовления пресноводных бассейнов используют также сталь, хотя она и ржавеет. При наличии соответствующего защитного покрытия сталь будет служить долго как в пресноводных, так и в морских системах. Покрытие увеличивает стоимость, и вряд ли сталь можно считать наилучшим материалом, особенно для систем с соленой водой. Однако сталь часто является самым недорогим материалом для конструктивных опор бассейна.

Алюминий хорошо служит в пресной воде, а некоторые алюминиевые сплавы долго служат и в системах с соленой водой. В замкнутых системах все металлы следует использовать с осторожностью, так как даже небольшая, но продолжительная эрозия может привести к накоплению ионов в культуральной среде.

Нержавеющая сталь надежна в эксплуатации в пресной воде и достаточно надежна в соленой воде. Однако даже коррозионно-стойкая нержавеющая сталь марки 300 подвержена коррозии в системах с соленой водой.

Для заградительных решеток и других подобных устройств можно использовать нержавеющую сталь, хотя и дорогостоящую, если пластмассовых материалов нет или если они не могут обеспечить необходимую прочность.

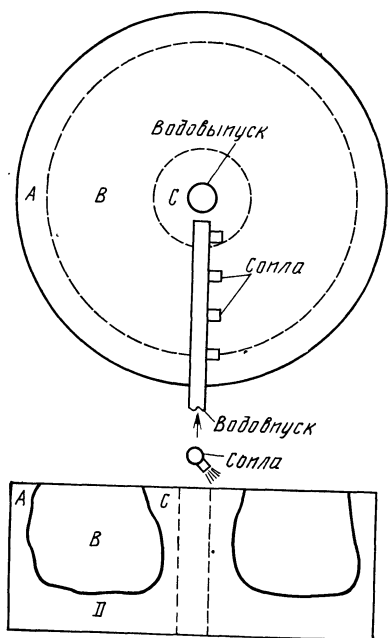


Рис. 12.13. Характер циркуляции в круглых бассейнах с большим отношением диаметра к глубине (3:1 и менее) (Larmoyeux and Piper, 1973)

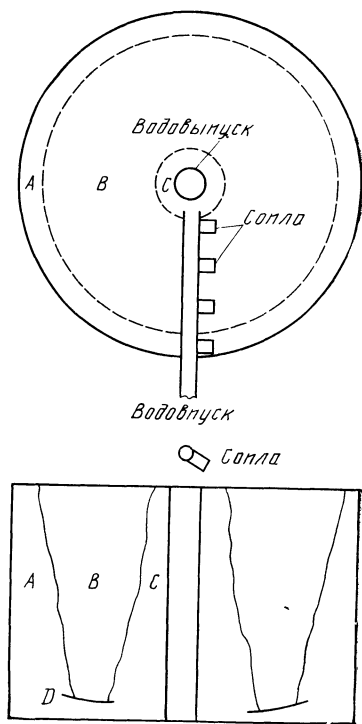


Рис. 12.14. Характер циркуляции в круглых бассейнах с небольшим отношением диаметра к глубине (5:1÷10:1) (Larmoyeux and Piper, 1973)

Форма бассейна. В рыбоводстве используются бассейны любой формы, однако чаще всего они бывают круглыми, прямоугольными и овальными с разделительной стенкой.

Часто используются круглые бассейны с водовпуском, обеспечивающим касательную составляющую скорости, которая поддерживает круговую циркуляцию в бассейне. Вода отводится, как правило, в центре бассейна через стояк или донный водоспуск.

Лармуае и Пайпер (Larmoyeux and Piper, 1973) и Бэрроуз и Ченовет (Burrows and Chenoweth, 1955) изучали характер течений в круглом бассейне с помощью водоструйных инжекторов, расположенных над бассейном. Струи воды были направлены по касательной к кругу при различных диаметрах отверстий и имели наклон ниже горизонтали под углом от 25 до 50°. На рис. 12.13 показаны зоны циркуляции в круглом бассейне с большим отношением диаметра к глубине (т. е. в мелком бассейне). Зона А — турбулентная зона, где происходит рассеивание большей части струйной энергии. Зона В — зона более низких скоростей, не имеющая обмена с остальной частью бассейна. Зона В — «мертвая зона»,

особенно при очень больших отношениях диаметра к глубине. Для этой зоны характерны низкое содержание кислорода и плохое распределение корма. Зона *C* — турбулентная зона. Поскольку водоструйные сопла находятся на поверхности, количество движения у поверхности больше. Это приводит к раскачиванию воды с результирующим вытекающим радиальным потоком у дна. Поверхностный поток не так ярко выражен, как втекающий донный поток. Почти весь поток из зоны *A* по направлению к водовыпуску проходит вдоль зоны *D*. Радиальный поток зоны *D* обеспечивает самоочищение круглых бассейнов, что является их основным преимуществом. В больших бассейнах радиальный поток в зоне *D* может вызвать направленный вверх вертикальный поток у заградительных решеток, если стояки снабжены такими решетками; это нежелательно, так как этот поток несет с собой вверх отходы и продукты обмена веществ. Эту проблему можно решить путем устройства донных водовыпусков и стояков для регулирования уровня воды вне бассейна.

На рис. 12.14 показаны четыре зоны в бассейнах с меньшим отношением диаметра к глубине. Вязкий поток зоны *B* стремится к дну, в результате чего зона *D* уменьшается. Вблизи защитной решетки высокие касательные скорости, вызываемые возникновением вихря, удерживают твердые частицы во взвешенном состоянии, так же как это наблюдается в бассейнах с большим отношением диаметра к глубине.

Круглые бассейны имеют некоторые преимущества. Обычно скорости воды в них выше, чем в прямоугольных, благодаря чему рыба, предназначенная для выпуска в естественные водоемы, оказывается лучше к этому подготовленной, однако у рыбы, выращиваемой в круглых бассейнах для продажи, энергетические потребности выше. В круглых бассейнах корм распределяется лучше, чем в выростных каналах, они эффективнее самоочищаются и работают при меньшем расходе воды (если потребности в кислороде из-за плотности посадки не являются фактором, определяющим поток). Стоимость изготовления и установки круглых бассейнов по сравнению с выростными каналами зависит от строительных материалов.

Широкое использование прямоугольных бассейнов объясняется тем, что их легко строить. Однако в прямоугольных бассейнах могут возникать определенные сложности. Рыба, выловленная в естественном водоеме и помещенная в прямоугольный бассейн, часто собирается в одном углу, что приводит к дефициту кислорода; иногда рыба пытается всплыть в угол бассейна, получает повреждения и выбивается из сил. У рыбы, выращенной в бассейне от икры до взрослых особей, такое поведение наблюдается редко. Циркуляция в прямоугольных бассейнах часто характеризуется наличием «мертвых зон» и отдельных мелких вихрей. Появляются обедненные кислородом участки, продукты обмена веществ скапливаются в «мертвых зонах», что приводит к стрессу рыбы или ее гибели. Данных о характере циркуляции в прямоугольных бас-

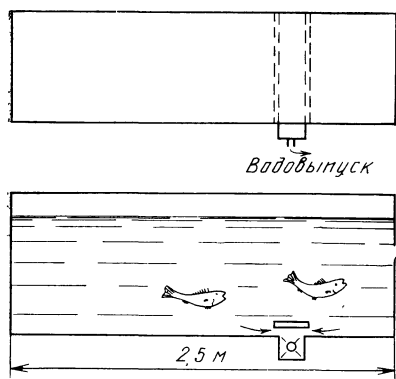


Рис. 12.15. Устройство для удаления твердых отходов из прямоугольного бассейна

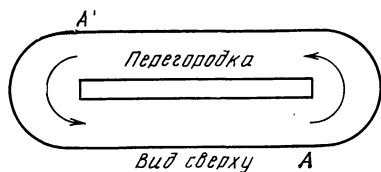


Рис. 12.16. Устройство овального бассейна

сейнах недостаточно. Одной из причин этого является то, что циркуляция и возникновение отдельных мелких вихрей зависят от конструкции втока и стока, скорости потока и других параметров. В прямоугольных бассейнах отходы и продукты обмена будут скапливаться на дне, если не принять меры к принудительному перемешиванию или поддержанию скорости потока на уровне, достаточном для их удаления.

На рис. 12.15 показана система для удаления отходов из прямоугольного бассейна размером $1,25 \times 2,5$ м. Под дном бассейна устроен лоток, из концевой части которого откачивают воду. Лоток накрывают крышкой, но так, чтобы она находилась на расстоянии 1—2 см выше дна бассейна. Крышка обеспечивает горизонтальное поступление воды (и твердых отходов) в лоток. Выкачиваемая из лотка вода уносит с собой отходы. Такая конструкция обеспечивает горизонтальную циркуляцию на дне, достаточную для удаления из бассейна твердых частиц размером $1,25 \times 2,5$ м. Чтобы частицы не оседали в лотке, скорость воды в нем должна превышать 0,8 м/с. Это довольно сложно, если длина лотка значительно превышает 1 м.

Овальные бассейны (рис. 12.16) состоят из двух параллельных прямых секций, разделенных перегородкой и соединенных двумя концевыми секциями, где осуществляется поворот на 180° , что позволяет воде непрерывно циркулировать по овалу.

Подача воды под напором через сопло и установка сопла в направлении циркуляции сообщают воде скорость. Сопла можно расположить над бассейном (как в круглом бассейне) или установить вертикально друг над другом в точке A или A' (см. рис. 12.16). Скорость воды можно регулировать с помощью лопастного колеса, установленного в одной или обеих прямоточных секциях бассейна. Ось лопастного колеса находится над поверхностью воды, но одна лопасть погружена в воду. Вращение колеса создает циркуляцию воды со скоростью, зависящей от частоты вращения и конструкции колеса (рис. 12.17). Основным преиму-

ществом лопастного колеса является возможность регулирования скорости циркуляции путем изменения частоты его вращения. Регулирование скорости циркуляции с помощью сопел связано с необходимостью изменения их размеров, напора или скорости потока.

Бассейн Фостера-Лукаса (такие бассейны большого размера называют также прудами) представляет собой овальный бассейн специальной конструкции, который одно время широко использовали для выращивания лосося и форели (рис. 12.18). Циркуляция создается с помощью сопел,

расположенных над бассейном в центре его прямых участков. Центральная перегородка состоит из двух смещенных по отношению друг к другу пластин, водовыпуск расположен в центре, между пластинами перегородки.

Бэрроуз и Ченовет (Burrows and Chenoweth, 1970) модифицировали бассейн Фостера-Лукаса, превратив его в рециркуляционный прямоугольный бассейн (рис. 12.19). Модификация заключается в том, что они выпрямили закругленные участки бассейна, установили направляющие поток лопатки по его углам и заменили центральный водовыпуск двумя донными выпускными отверстиями с заградительной решеткой. Такой прямоугольный бассейн легче построить, так как он имеет прямые углы, но установка направляющих лопаток по углам связана с дополнительными расходами, кроме того, лопатки необходимо периодически очищать. Изменение расположения водовыпусков способствует удалению твердых частиц.

Бэрроуз и Ченовет (Burrows and Chenoweth, 1955) сравнили характер потока и образование отдельных мелких вихрей в круглом бассейне, выростном канале и бассейне Фостера-Лукаса (рис. 12.20, 12.21, 12.22). В круглом бассейне (диаметр 7,6 м, глубина 0,75 м) характер течения по наблюдениям этих авторов сходен с описанным выше. В идеале вода, впускаемая по касательной,

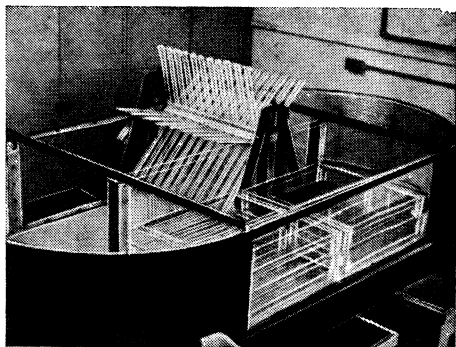


Рис. 12.17. Лопастное колесо для обеспечения циркуляции воды в овальном бассейне

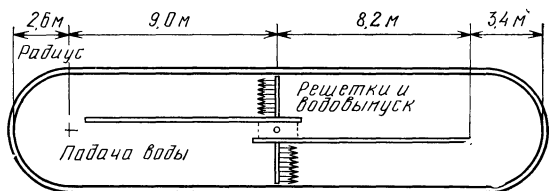
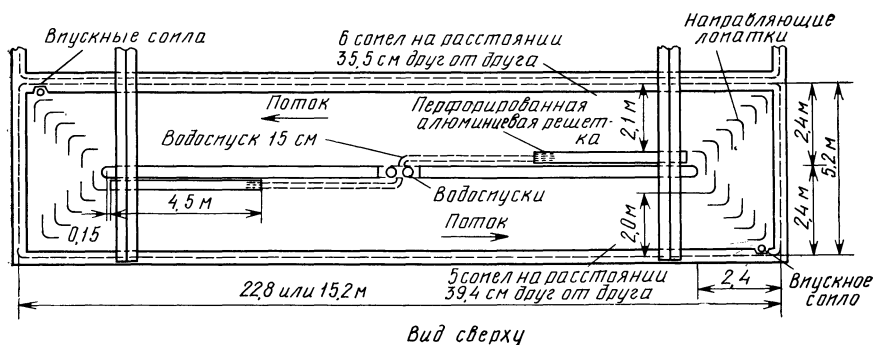


Рис. 12.18. Бассейн Фостера-Лукаса (Burrows and Chenoweth, 1955)



Вид сверху

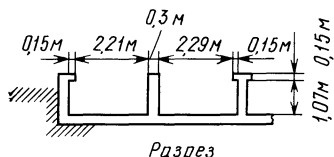


Рис. 12.19. Циркуляционный прямоугольный бассейн (Burrows and Chenoweth. 1955)

должна идти по пологой спирали по направлению к выпускному отверстию, но в действительности этого не происходит (рис. 12.20). У дна наблюдались отдельные мелкие вихри. В круглом бассейне это обычно нежелательное явление способствовало самоочищению, поэтому оно не было полностью нежелательным. Большим недостатком этих бассейнов было образование торусообразной «мертвой зоны».

В выростном канале циркуляция носит совершенно другой характер. На рисунке 12.21, а показана циркуляция в канале при несимметричном водовпуске, показанном на рис. 12.21, г. Характер течения на рис. 12.21, б является результатом перекрытия одной половины водовпуска, показанного на рис. 12.21, г. По рис. 12.21, а и 12.21, б можно судить о влиянии расположения впуска и выпуска на характер циркуляции в выростном канале. Из-за большой скорости на входе турбулентность наблюдается на большей части длины канала. Поскольку циркуляция несвойственна выростному каналу, скорость воды в нем будет сравнительно невелика при условии, что объем воды не слишком большой. Установка экранов для регулирования турбулентности на входе уменьшает образование отдельных мелких вихрей. Поддержание условий ламинарного потока ($Re < 2000$) под впускным отверстием способствует приближению к условиям течения со структурным ядром. Для обоих вариантов впуска воды в выростном канале (см. рис. 12.21) образуются «мертвые зоны» главным образом вследствие турбулентности.

На рис. 12.22 показан характер циркуляции в бассейне Фостера-Лукаса. Турбулентный поток возникает в районе центральной перегородки после того, как вода прошла поворот. В своей конструкции прямоугольного рециркуляционного бассейна Бэрроуз и Ченовет (1970) использовали эти турбулентные зоны для водовы-

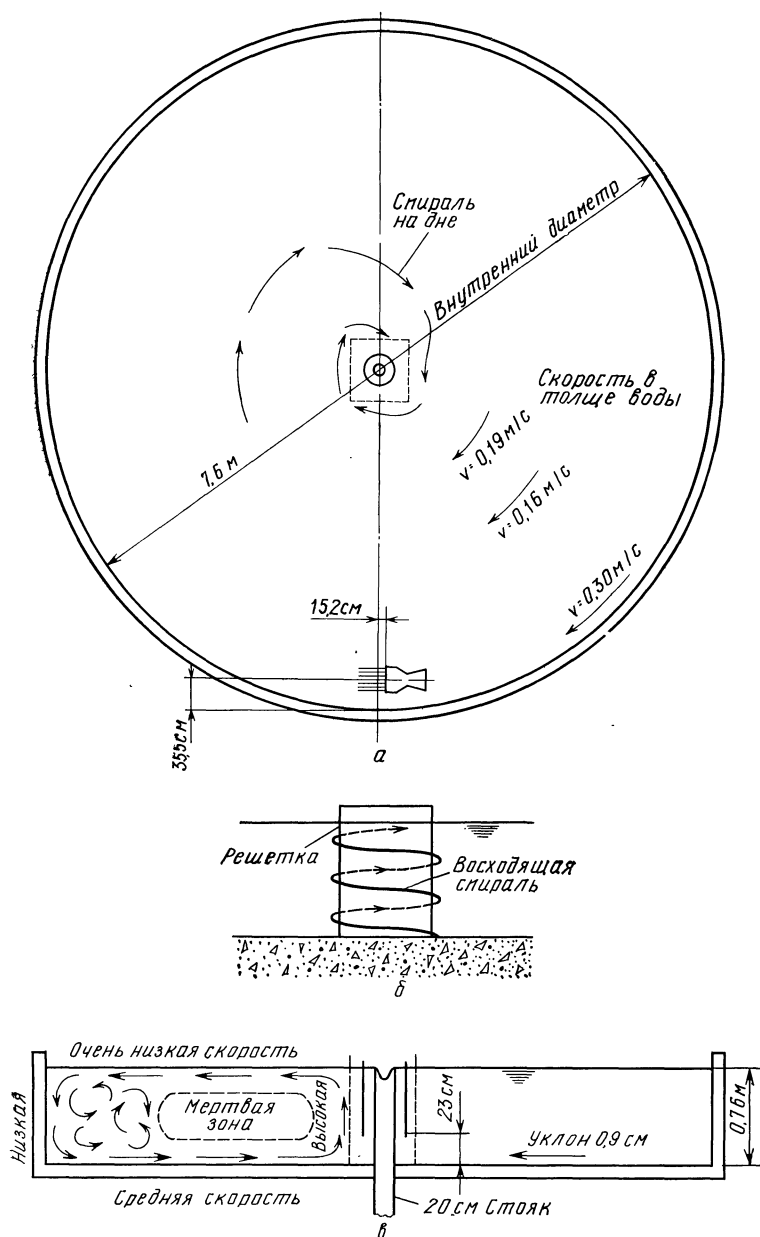


Рис. 12.20. Циркуляция в круглом бассейне:
 а — круглый бассейн в плане; б — течение вокруг решетки; в — разрез
 (Burrows and Chenoweth, 1955)

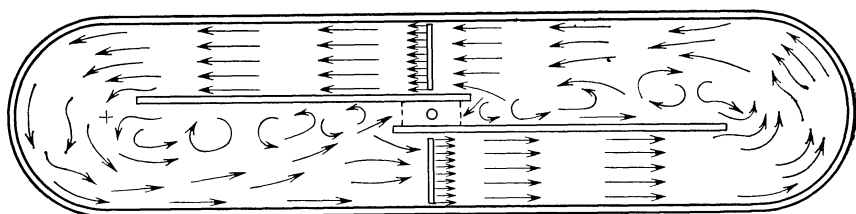
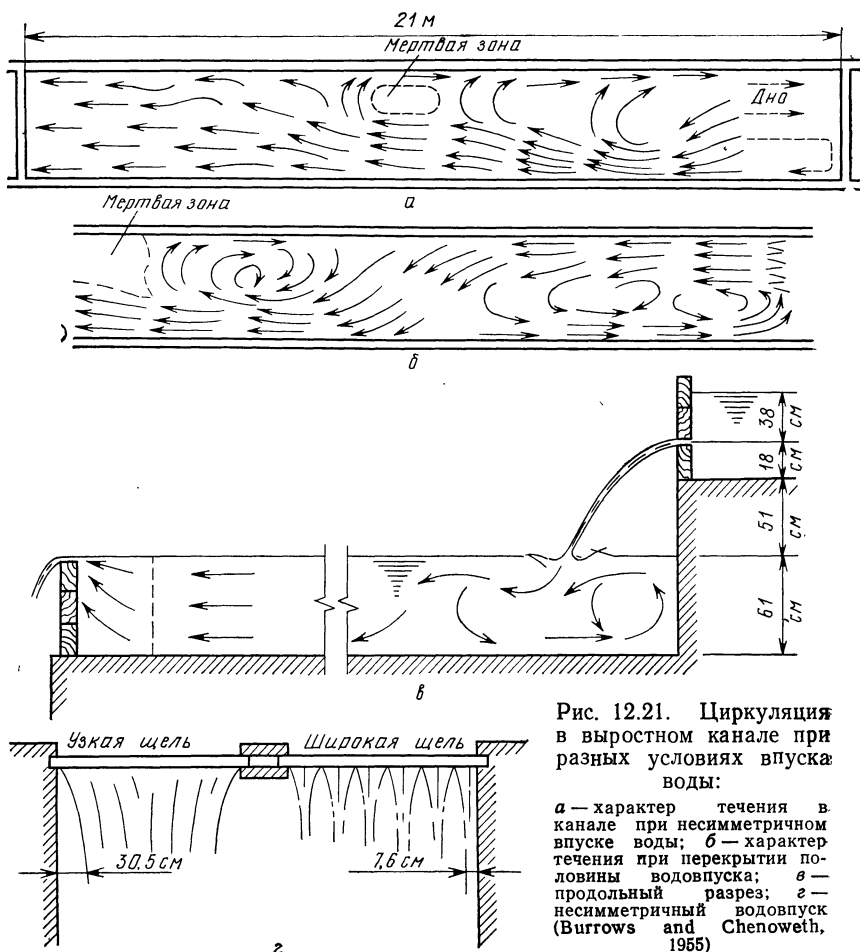


Рис. 12.22. Характер циркуляции в бассейне Фостера-Лукаса

пусков, что способствует самоочищению бассейна. Поскольку движущиеся частицы имеют тенденцию двигаться по прямой, если ничто этому не препятствует, скорости у внешних стенок бассейна Фостера-Лукаса выше, чем у перегородки. Таким образом, турбу-

лентные зоны являются также зонами более низких скоростей, и оседание происходит сначала в этих зонах. Расположенные в этих зонах водоспуски выносят твердые частицы по мере их оседания.

Шелл (Shell, 1966) сравнил темпы роста и выживаемость рыбы в бетонных и пластмассовых бассейнах и в земляных прудах. Он обнаружил разницу в темпе роста, но не смог определить причину. Зависимости между выживаемостью и типом бассейна или пруда он не обнаружил.

Выше были рассмотрены наиболее распространенные типы прудов, выростных каналов и бассейнов, но существуют и другие. Например, Снид и Коджорт (Sneed and Cojort, 1959) описали спиральный бассейн, строительство которого обходится сравнительно недорого. Недавно появилась еще одна конструкция бассейна, которая находит довольно широкое применение при выращивании рыбы с высокой плотностью посадки.

На рис. 12.23 показан этот цилиндрический бассейн (бункер). Это глубокий бассейн, воду в который закачивают насосом по трубе, проходящей в центре. Выйдя из трубы, вода в бассейне поднимается вверх, а сливается в лоток вокруг бассейна. Такие системы обычно работают по замкнутому циклу, в них включены фильтры, улучшающие качество воды. Характерными чертами такого бассейна являются высокая скорость потока и плотность посадки. Например, Басс и др. (Buss et al., 1970) сообщают, что в цилиндрический бассейн высотой 5 м и диаметром 2,29 м при скорости потока около 28,4 л/с было посажено 2820 кг радужной форели и никаких сложностей не возникло. Это означает, что плотность посадки составляла 136 кг/м³, или 27,5 кг/(м³/с).

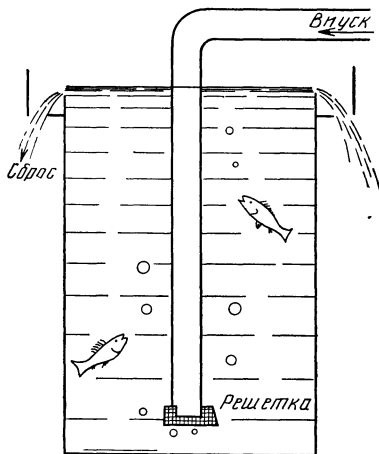


Рис. 12.23. Цилиндрический бассейн

СЕТНЫЕ ОГРАЖДЕНИЯ

В рыбоводстве применяются в основном два типа сетных ограждений. Ограждения первого типа применяются на сравнительно небольших глубинах (обычно менее 10 м) и состоят из неподвижных шестов, свай и других вбиваемых в дно опор, на которые натянута сеть. На больших глубинах, чтобы опоры выдерживали нагрузки, их пришлось бы располагать ближе друг к другу и предельно увеличивать их размеры, да и стоимость такого сооружения была бы слишком высокой; поэтому на больших глубинах используют заякоренные плавучие ограждения.

При проектировании сетных ограждений необходимо учитывать нагрузки, которые делятся на статические и динамические. Статические нагрузки включают вес сооружения (сеть, опоры и другие элементы конструкции), а также дополнительные нагрузки, связанные с уходом и эксплуатацией. Динамические нагрузки возникают под действием сил ветра над поверхностью воды, волн на поверхности раздела между воздухом и водой и течений (особенно приливных). Могут возникнуть и дополнительные динамические нагрузки из-за собирающегося у сооружения плавающего мусора и обломков, столкновения с катерами и лодками или крупными хищниками (например, акулами). Помимо действия этих основных сил прочность любого сооружения в пресной или морской воде изменяется под действием коррозии и обрастания, а также размыва дна.

Статические нагрузки в определенной степени зависят от характера конструкции. Коррозия со временем снижает статические нагрузки, в то время как обрастание может значительно их увеличить за сравнительно короткий срок. В табл. 12.2 показано

Таблица 12.2. Сезонное увеличение веса сетей в результате обрастания при постоянном погружении в морскую воду у побережья Шотландии (Milne, 1970)

Материал	Вес 1 м ² , Н			
	без обрастания	в июле	в сентябре	в ноябре
Нейлон	2,26	6,8	194	240
Ульстрон	3,33	10,0	216	370
Курлен	1,96	5,9	169	249
Полиэтилен				
стандартный	1,77	5,3	200	356
с медным покрытием	1,77	3,5	80	168
Нетлон	3,33	6,7	123	163
Пластабонд	31,87	55,8	350	446
Гальванизированная сеть				
плетеная	19,91	25,9	30	74,7
сварная	33,34	43,3	50	117

влияние обрастания на статический вес сетей различного типа.

Динамические нагрузки зависят от гидрологических и метеорологических условий в районе работ. Интенсивность обрастания, а в меньшей степени и интенсивность коррозии также зависят от района работ. Поскольку динамические нагрузки (включая дополнительные нагрузки в результате обрастания) часто значительно превышают статические, проектирование сетных сооружений требует тщательного изучения гидрологических, метеорологических и гидробиологических характеристик конкретного района. Данные о скоростях ветра, высоте волн, приливах и отливах и некоторую другую информацию можно получить из таблиц, так как расчетные данные по этим параметрам являются статистическими. Например,

для определения высоты сетного ограждения над уровнем полной воды необходимы данные по максимальной высоте волн, ожидаемой в течение всего срока службы сооружения. Эти данные зависят от разгона волн перед проектируемым сооружением и ожидаемой скорости ветра. Данные по ожидаемой скорости ветра имеют-ся в виде интервалов повторяемости (например, ветер скоростью 160 км/ч наблюдается на участке A один раз в 100 лет, а ветер скоростью 120 км/ч — один раз в 10 лет). Ожидаемый интервал повторяемости можно определить статистическими методами по результатам многолетних наблюдений.

Интенсивность обрастания также можно определить методами статистики, но обрастание в значительной мере зависит от конкретного участка, поэтому прогноз обрастания требует наблюдений на этом участке. Из-за отсутствия истории таких наблюдений на конкретных участках эти данные обычно можно получить только опытным путем. Другие факторы, например течения, также часто подвержены значительным местным и сезонным колебаниям. Все это свидетельствует о необходимости тщательного анализа всех данных по конкретному участку до начала проектирования сооружения.

Сила ветра. Ветровую нагрузку испытывают все части сетного сооружения, находящиеся над поверхностью воды. Особенно значительную ветровую нагрузку испытывают мелкаячейные сети. Максимальных величин эта нагрузка достигает при отливе. Ветровую нагрузку испытывают также понтоны и другие устройства, удерживающие сетные сооружения на плаву.

Важной величиной при расчете сооружения является ожидаемая максимальная скорость ветра. Поскольку такой скорости ветер обычно достигает при порывах, в расчетах нельзя использовать среднюю скорость ветра. Ван Бовен (Van Boven, 1968) вывел уравнение для определения ветровой нагрузки на сплошное сооружение:

$$F_w = 0,946 A v^2, \quad (12.4)$$

где F_w — сила ветра, Н; A — площадь проекции сети на плоскость, перпендикулярную направлению ветра, m^2 ; v — скорость ветра, м/с.

Уравнение (12.4) позволяет определить силу ветра, действующую на сплошную конструкцию, например пенопластовый поплавок или пустую стальную бочку.

Сеть не является сплошным материалом, и поэтому уравнение (12.4) к ней неприменимо. В работе Милна (Milne, 1970) приведено уравнение, полученное японскими учеными (Tamura and Yamada, 1963) на основании проведенных ими опытов с рыболовной сетью в аэродинамической трубе:

$$F_w = 0,182 A v^2, \quad (12.$$

где F_w — сила ветра, Н; A — площадь проекций сети на плоскость, перпендикулярную направлению ветра, m^2 ; v — скорость ветра, м/с.

Милн (Milne, 1970) критикует уравнение (12.5) на том основании, что оно не учитывает размеров ячеи и типа сетного полотна. При одном и том же диаметре нити более крупная ячея будет иметь меньшую площадь. Милн (1970, 1972) приводит данные в поддержку своих доводов. Его данные показывают, что уравнение (12.5) подходит для ультратонкой сети с ячеей 25 мм, плетеной сети из пластабонда с ячеей 25 мм и гальванизированной сварной сети с ячеей 25 мм при скоростях ветра от 20 до 60 м/с, но дает значительно завышенные значения для нейлоновой сети с ячеей 25 мм, курленовых сетей с ячеей 25 мм и гальванизированной сварной сети с ячеей 75 мм. Например, удельная ветровая нагрузка при скорости 50 м/с, рассчитанная по уравнению (12.5), составляет около 440 м². Однако измеренная удельная ветровая нагрузка, действующая на 25-миллиметровую нейлоновую ячею, равна 380 Па, на 75-миллиметровую гальванизированную сварную ячею — 170 Па. Милн (1970) не указывает, является ли площадь проекции одной и той же для всех этих материалов.

Поскольку уравнение (12.5) не учитывает типа и размера ячеи, Милн (1970) предлагает использовать другую зависимость, выведенную Панкхерстом и Холдером (Pankhurst and Holder, 1952). Это уравнение было получено на основании опытов, проведенных в аэродинамической трубе для оценки сопротивления тонкой металлической сетки.

$$P_w = 1/2K\rho v^2, \quad (12.6)$$

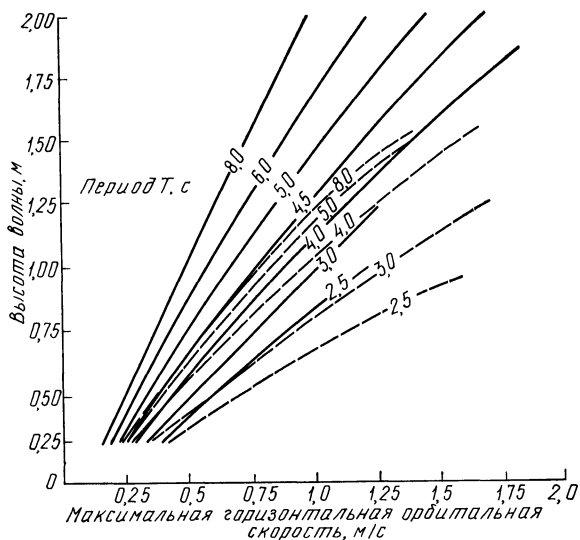
где P_w — давление ветра, Па; ρ — плотность воздуха, кг/м³; v — скорость воздуха, м/с; K — коэффициент сопротивления, равный $(1-B)/B^2$; B — коэффициент заполнения аэродинамической трубы, равный $(1-d/L^2)$; d — диаметр нити, м; L — номинальный размер ячеи, м.

Хотя уравнение (12.6) позволяет учитывать размер ячеи и диаметр нити, его нельзя считать полностью удовлетворительным, так как эффект обрастания можно учесть только введением поправки в диаметр нити.

Уравнение (12.5) можно использовать только при ячее 25 мм и более. Расчетных формул для ячеи менее 25 мм, по-видимому, не существует. При расчетах для ячеи 25 мм можно использовать кривые Милна (1970) для небросших сетей. Другого, более удовлетворительного метода учета эффекта обрастания на силу ветра, чем тот, который предусмотрен уравнением (12.6), по-видимому, не существует. Расчет ветровых нагрузок на сетные сооружения требует дополнительных обширных исследований.

Сила волн. Как и в случае силы ветра, расчет силы волн, действующей на сетное ограждение, должен быть основан на самой большой (т. е. самой высокой) волне, ожидаемой (с малой вероятностью) в течение расчетного срока службы сооружения. Высота волны зависит от среднечасовой скорости ветра, длины разгона и глубины. Рассчитать высоту и период волны можно с помощью данных по ожидаемой скорости ветра, длине разгона и карты глубин (Shore Protection Planning and Design, 1966). Для

Рис. 12.24. Максимальные горизонтальные орбитальные скорости при глубине 6,1 м (пунктирная линия) и 15,2 м (сплошная линия) для волн различной высоты и периодов (Milne, 1970)



открытых береговых участков следует использовать высоту волны на глубине, а для защитных участков в реках или заливах можно брать для расчета высоту волны на мелководье (Milne, 1970). В некоторых районах важно учитывать ширину разгона; поскольку она может уменьшать максимальную высоту волны. Более подробно этот вопрос рассмотрен в работе Сэвилла (Saville, 1954).

Сила волн, действующая на сетное сооружение, зависит от орбитальной скорости частиц воды в волне (Milne, 1970). Орбитальная скорость частиц воды в свою очередь зависит от периода волны T_p , ее длины λ и глубины воды d . Милн (1970), используя теорию Стокса в изложении Вигеля (Wiegel, 1965), построил график зависимости между высотой волны, глубиной воды, периодом волны и максимальной горизонтальной орбитальной скоростью частиц в волне (рис. 12.24). Максимальная вертикальная орбитальная скорость составляет около 82,5 % максимальной горизонтальной скорости, показанной на рис. 12.24.

Тамура и Ямада (Tamura and Jamada, 1963) вывели уравнения зависимости между горизонтальной и вертикальной силами волн, действующими на сетное сооружение, и горизонтальным и вертикальным движением молекул воды:

$$F_h = 2,15v_h; \quad (12.7)$$

$$F_v = 1,80v_v, \quad (12.8)$$

где F_h — горизонтальная сила; F_v — вертикальная сила; v_h — максимальная горизонтальная скорость частицы воды в волне; v_v — максимальная вертикальная скорость частицы воды в волне.

Поскольку уравнения (12.7) и (12.8) не учитывают различия в размере ячеек и материале сети, Милн (1970) предлагает использовать приводимые ниже уравнения сопротивления приливному те-

чению, которые, по его мнению, дают более надежные результаты. Однако, поскольку обрастание и плавающие на поверхности обломки и мусор могут значительно изменить коэффициент сопротивления, этот фактор также следует принимать в расчет. Милн (Milne, 1970) показал, что сопротивление обросших сетей приливному течению может быть в 2 раза выше сопротивления таких же, но необросших сетей.

Сила течений. В большинстве случаев желательно, чтобы сетные ограждения хорошо промывались приливными течениями. Под действием воды, проходящей сквозь сеть, она, а также опоры или заякоривающие устройства испытывают нагрузки, которые также необходимо учитывать. Каваками (Kawakami, 1964) вывел уравнение для определения нагрузки на сеть, создаваемой потоком, направленным к ней под прямым углом:

$$F_c = 4,9 \rho v^2 A C_d, \quad (12.9)$$

где F_c — сила течения, действующая на сеть, Н; C_d — коэффициент сопротивления ячеи (безразмерный); ρ — плотность воды, кг/м^3 ; v — скорость течения, м/с ; A — площадь проекции сети, равная $2ad$, м^2 ; a — номинальный размер ячеи, м ; d — диаметр нити, м .

Милн (Milne, 1970) приводит следующие уравнения для вычисления C :

для узловой сети

$$C_d = 1 + 3,77 (d/a) + 9,37 (d/a)^2; \quad (12.10)$$

для безузловой сети

$$C_d = 1 + 2,73 (d/a) + 3,12 (d/a)^2, \quad (12.11)$$

где d и a — те же, что и в уравнении (12.9).

По уравнению (12.9) и уравнению (12.10) или (12.11) можно рассчитать силу действия течения на сетное ограждение (необросшее). Силу действия течения можно также рассчитать и для обросшей сети путем введения соответствующей поправки на обрастание в значения d и a . С помощью табл. 12.3 и уравнения (12.9) можно определить воздействие обрастания на сеть, находившуюся в морской воде в течение одного месяца. Например, сила действия течения скоростью 1 м/с на нейлоновую сеть с ячейей 2,50 см составляет 0,42 Н на ячейю для необросшей сети и 5,1 Н на ячейю для сети, находившейся в морской воде в течение месяца. Таким образом, обрастание в течение месяца увеличило силу действия течения на сеть в 12 раз.

Эксплуатация. Сетные ограждения могут получать повреждения от плавающих обломков, крупных хищников (например, акул) и т. п. Поскольку даже сравнительно небольшое отверстие в ограждении означает потерю почти всей рыбы, целесообразно с наружной стороны рыбоудерживающего ограждения устраивать еще одно более крупноячеечное ограждение, но так, чтобы эти две сети не терлись одна о другую, в противном случае либо одна из них, либо обе получают повреждения в результате перетирания.

Таблица 12.3. Сравнение коэффициентов сопротивления C различных сетных материалов до и после месячного пребывания в морской воде (Milne, 1970)

Материал	Тип ячеи*	Номинальный размер ячеи a , см	Необросшая сеть		Обросшая сеть	
			диаметр нити, см	C_d	диаметр нити, см	C_d
Нейлон	P	2,5	0,23	1,416	1,02	3,985
Ульстрон	P	2,5	0,25	1,470	1,02	3,985
Курлен	P	2,5	0,19	1,332	0,89	3,455
Полиэтилен	K	2,5	0,15	1,260	0,76	2,953
Полиэтилен с медным покрытием	K	2,5	0,15	1,260	0,51	2,129
Плетеная сеть из пластабонда	P**	2,5	0,25	1,304	0,51	1,671
Гальванизированная плетеная сеть	P**	2,5	0,20	1,238	0,38	1,48
Плетеная сеть из пластабонда	P**	7,6	0,25	1,094	0,64	1,25
Нетлон	K**	5,0	0,33	1,192	0,76	1,48
Гальванизированный курлен	K**	2,5	0,25	1,304	0,33	1,408
Курлен	P	2,65	0,35	1,198	1,02	1,78

* P—ромбовидная ячея; K—квадратная ячея.

** Безузловая сеть.

При ограждении больших участков необходимо предусмотреть возможность доступа в них небольших лодок. Это осуществляют либо подъемом и перенесением лодки через сеть, либо путем устройства в сети двухсекционного прохода для лодки.

Все сети требуют периодической чистки и ремонта. При проектировании следует решить, будут ли эти работы выполнять водолазы или потребуются вынимать сетные секции из воды. Если будет принято решение вынимать секции из воды для чистки и ремонта, следует предусмотреть способы предотвращения выхода рыбы из ограждения. Кроме того, секции должны быть достаточно небольшими для работы с ними с помощью имеющейся техники. Вес вынимаемой из воды секции будет складываться из веса чистой пластины и веса обрастания.

Проектные расчеты. Выше при рассмотрении статических нагрузок и нагрузок на сетное ограждение под действием ветра, волн и течений каждая нагрузка рассчитывалась отдельно, но следует помнить, что все эти нагрузки могут действовать одновременно. Таким образом, проектируемое сооружение должно выдерживать сумму всех нагрузок, и в расчете принимается, что все силы действуют одновременно в одном направлении. При использовании двух сетей нагрузка на опорные сооружения складывается из нагрузок двух сетей.

Определение допустимого напряжения для сетей не является таким простым, как, например, в случае со стальной балкой. Прочность сети зависит от типа и размера нити, конструкции

ячей (размер, с узлом или без узла и т. д.), состояния сети (сырая или сухая), а для некоторых синтетических материалов и от того, как долго сеть находилась под действием солнечного света. Учитывается также удлинение материала.

Обсуждение характеристик различных сетных материалов, их номенклатуры и свойств выходит за рамки данной книги. Более подробную информацию можно найти в книге «Современные орудия рыболовства» (*Modern Fishing Gear of the World*, V.2, 1964). Данные о прочности сетей, удлинении и т. д. можно получить у поставщика или изготовителя.

Шимозаки (Shimozaki, 1964) рекомендует безузловое сетное полотно для фиксированных сетей. Материал должен обладать высоким сопротивлением солнечному свету и выветриванию и обеспечивать достаточную прочность. Сеть с удельным весом более 1 будет тонуть, что для фиксированных сетей является положительным свойством. Важным соображением является также стоимость. Шимозаки (Shimozaki, 1964) рекомендует сетное полотно из поливинилиденхлорида или винилхлорида. Можно применять также сети, изготовленные на основе поливинилового спирта, но они имеют слабую устойчивость к климатическим воздействиям и низкий удельный вес. Полиэтилен также находит лишь ограниченное применение из-за низкого удельного веса. Не удовлетворяет требованиям, предъявляемым к сетным ограждениям, и нейлон из-за своего небольшого удельного веса, слабой светостойкости и высокой стоимости.

REFERENCES

- Bardach, John E., John H. Ryther, and William O. McLarney (1972). *Aquaculture: The Farming and Husbandry of Freshwater and Marine Organisms*. Wiley-Interscience, New York.
- Burrows, Roger E. and Harry H. Chenoweth (1955). Evaluation of Three Types of Fish Rearing Ponds, Research Report 39. Fish and Wildlife Service, U. S. Department of Interior, Washington, D. C.
- Burrows, Roger, E. and Harry H. Chenoweth (1970). The Rectangular Circulating Rearing Pond. *Progressive Fish-Culturist* 32(2): 67—80.
- Buss, Keen, Delano R. Graff, and Edward R. Miller (1970). Trout Culture in Vertical Units. *Progressive Fish-Culturist* 32 (4): 187—191.
- Buss, Keen and Edward R. Miller (1971). Considerations for Conventional Trout Hatchery Design and Construction in Pennsylvania. *Progressive Fish-Culturist* 32 (2): 86—94.
- Engineering Field Manual (1969). Chapter 11, Ponds and Reservoirs. Soil Conservation Service. U. S. Department of Agriculture. Washington, D. C.
- Frevert, Richard K., Glenn O. Schwab, Talcott W. Edminster, and Kenneth K. Barnes (1962). *Soil and Water Conservation Engineering*, 3rd printing. Wiley, New York.
- Handbook of Ocean and Underwater Engineering, John J. Myers, Ed. (1969). McGraw-Hill, New York.
- Huet, Marcel (1970). Textbook of Fish Culture, Breeding and Cultivation of Fish. Fishing News (Books) Ltd., London.
- Johnson, Harlan E. and Alfred C. Gastineau (1952). A Comparison of the Growth of Fingerling Chinook Salmon Reared in Ponds, Troughs and Circular Tanks. *Progressive Fish-Culturist* 14 (2): 76—78.

- Kawakami, T. (1964). The Theory of Designing and Testing Fishing Nets in Model, in *Modern Fishing Gear of the World*, Vol. 2. Fishing News (Books) Ltd., London, pp. 471—489.
- Larmoyeux, Jack D. and Robert G. Piper (1973). Evaluation of Circular Tanks for Salmonid Production. *Progressive Fish-Culturist* 35 (3): 122—131.
- Lee Jasper S. (1973). *Commercial Catfish Farming*. Interstate Printers and Publishers, Danville, Ill.
- Leitritz, Earl (1959). Trout and Salmon Culture. *Fishery Bulletin* 107, California Department of Fish and Game, 169 pp.
- Milne, P. H. (1970). *Fish Farming: A Guide to the Design and Construction of Net Enclosures*. Marine Research No. 1, Department of Agriculture and Fisheries for Scotland.
- Milne, P. H. (1972). *Fish and Shellfish Farming in Coastal Waters*. Fishing News (Books) Ltd., London.
- Modern Fishing Gear of the World*, Vol. 2 (1964). Fishing News (Books) Ltd., London.
- National Engineering Handbook* (1971). Section 2, Part 1, Engineering Practice Standards, Engineering Conservation Practices. Standard Number 358, Irrigation Ditch and Canal Lining—Flexible Membrane. Soil Conservation Service, U.S. Department of Agriculture, Washington, D. C.
- Palmer, David D., H. William Newman, Robert I. Azevedo, and Roger E. Burrows (1952). Comparison of the Growth Rates of Chinook Salmon Fingerlings Reared in Circular Tanks and Foster-Lucas Ponds. *Progressive Fish-Culturist* 14 (3): 122—124.
- Pankhurst, R. C. and D. W. Holder (1952). *Wind Tunnel Technique*. Pitman, London.
- Ponds for Fishing* (1968). Missouri Department of Conservation, St. Louis.
- Ponds for Water Supply and Recreation* (1971). Agriculture Handbook 387. Soil Conservation Service. U.S. Department of Agriculture, Washington, D. C.
- Robinson, William R., Jr. and Peter Vermesoni (1969). Low Cost Circular Concreted Ponds. *Progressive Fish-Culturist* 31 (3): 180—182.
- Saville, T., Jr. (1954). The Effect of Fetch Width on Wave Generation. Technical Memo, Beach Erosion Board, U.S. Army Corps of Engineers, Washington, D. C.
- Shell, E. W. (1966). Comparative Evaluation of Plastic and Concrete Pools and Earthen Ponds in Fish Cultural Research. *Progressive Fish-Culturist* 28 (4): 201—205.
- Shimozaki, Yoshinori (1964). Production and Characteristics of Synthetic Nets and Ropes in Japan. In *Modern Fishing Gear of the World*, Vol. 2. Fishing News (Books) Ltd., London, pp. 66—70.
- Shore Protection, Planning and Design*, 3rd, ed. (1966) Technical Report. U.S. Army Coastal Engineering Research Center (4), Washington, D. C. 561 pp.
- Sneed, Kermit E. and Clarence E. Cojort (1959). An Inexpensive Experimental Spiral Raceway. *Progressive Fish-Culturist* 21 (1): 80.
- Tamura, T. and S. Yamada (1963). Study of the Construction Works of Fish Ponds from Civil Engineering Viewpoint. Booklet of the Marine Resources Conservation Society of Japan (1), 32 pp.
- Trout Ponds for Recreation* (1971). Farmers Bulletin 2249, U.S. Department of Agriculture, Washington, D. C.
- Van Boven, C. J. P. (1968). Design Considerations for Permanent Type Off-shore Structures. Offshore Europe Scientific Surveys (Offshore) Ltd., London.
- Wiegel, R. L. (1965). *Oceanographical Engineering*. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N. J. 532 pp.
- Willoughby, Harvey (1968). A Method for Calculating Carrying Capacities of Hatchery Troughs and Ponds. *Progressive Fish-Culturist* 30 (3): 173—174.

Глава 13. ФИЛЬТРАЦИЯ

Физиологической средой для жизни водных организмов на предприятиях по разведению водных организмов является вода. Подача корма и выведение продуктов экскреции производятся также через воду. Избыточная концентрация корма или продуктов выделения может сделать водную среду токсичной для рыб. Процесс удаления избыточного количества веществ называется фильтрацией. Таким образом, фильтрация — это разделение смеси или раствора на компоненты, которые могут представлять собой чистые вещества или смеси нескольких веществ.

По виду фазового состояния разделяемых материалов фильтрующие системы можно разделить на семь классов: 1) жидкость — жидкость; 2) жидкость — твердые тела; 3) жидкость — газ; 4) газ — твердые тела; 5) газ — газ; 6) твердые тела — твердые тела; 7) твердые тела — жидкость — газ.

В системе жидкость — жидкость происходит разделение двух или более жидкостей, в системе жидкость — газ — отделение жидкости от газа. Аналогичные определения можно дать остальным приведенным системам. Из приведенных семи классов для специалистов, занимающихся разведением водных организмов, представляют интерес классы 1, 2, 3 и 7-й, из них наибольшее распространение в инженерной практике получили первые два. Классы 4 — 6-й для нужд предприятий по разведению водных организмов применяются сравнительно редко.

При выборе способа фильтрации изучаются свойства разделяемых материалов и выявляются такие различия, которые могут способствовать их разделению. К ним относятся плотность, крупность частиц, электрические, химические и магнитные свойства.

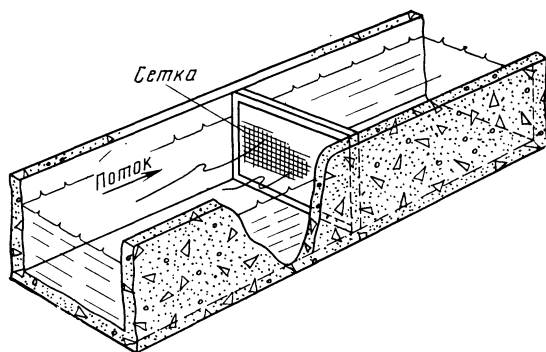
Установив свойства разделяемых материалов, остается выбрать способ фильтрации. Если возможны несколько способов, следует выбрать такой, который обеспечивает наибольшую производительность и экономичность.

Промышленность в настоящее время выпускает сотни фильтров самых разнообразных конструкций. Чтобы сделать правильный выбор, необходимо хорошо знать различные типы и основные принципы действия фильтров. Ниже описаны механические, гравитационные, химические и биологические фильтры.

МЕХАНИЧЕСКИЕ ФИЛЬТРЫ

Механическая очистка вод на предприятиях по разведению водных организмов применяется главным образом для отделения от жидкости твердых тел. Иногда механические фильтры применяются для разделения жидкостей. Действие механических фильтров основано на различии в размерах частиц раствора или смеси, что позволяет извлечь одну часть (части) из другой (других). Механические фильтры просты по конструкции и при условии правильной эксплуатации не требуют сложного технического об-

Рис. 13.1. Неподвижный сетчатый фильтр, установленный в канале



служивания. Промышленность выпускает ряд типоразмеров механических фильтров, рассчитанных практически на любую производительность и предназначенных для извлечения фракций любого размера. Механическая фильтрация заключается в том, что фильтр задерживает все фракции определенного размера, в то время как фракции большего или меньшего размера пропускает. Если содержание взвешенных примесей в смеси превышает допустимую концентрацию, стоимость очистки и эксплуатационных расходов возрастает.

Неподвижные сетчатые фильтры. Сетчатые фильтры — наиболее распространенные механические фильтры. Простейший сетчатый фильтр (рис. 13.1) представляет собой неподвижную сетку, установленную поперек потока. Частицы твердого материала, размер которых превышает размер ячеек сетки, задерживаются и собираются на ней. Для частиц размером менее 1,5 мм и их высокой концентрации неподвижные сетки почти не применяются, поскольку они быстро забиваются. Для очистки сетку вынимают и промывают водой под давлением в направлении, противоположном направлению движения потока во время фильтрации. Допускается также механическая очистка вручную щетками и другими приспособлениями.

Неподвижные сетчатые фильтры относятся к числу недорогих фильтрующих устройств. Установка и эксплуатация их просты, и они достаточно эффективны для отделения частиц, размер которых превышает размер ячеек сетки. Однако при высокой концентрации взвешенных частиц в движущемся потоке очистка сетки обходится довольно дорого. Если очистка выполнена неудовлетворительно, сетка может значительно затруднять движение потока. Выпускаются сетки с размером ячеек от нескольких сантиметров до нескольких микрон. При размерах ячеек менее 1,5—3 мм стоимость сетки резко возрастает. Сетки изготавливаются из различных материалов: от углеродистой стали, латуни и нержавеющей стали до всевозможных технических тканей. При работе с коррозионно-активными жидкостями можно использовать сетки

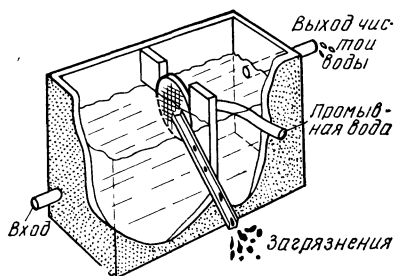


Рис. 13.2. Прямоточный вращающийся сетчатый фильтр

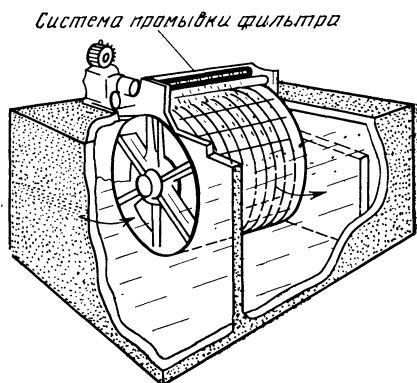


Рис. 13.3. Радиальный вращающийся сетчатый фильтр с системой обратной промывки

из пластмассы, однако конструкция таких фильтров должна учитывать низкую прочность пластмасс.

Вращающиеся сетчатые фильтры. Если сетка быстро засоряется и ее очистка стоит слишком дорого или в таких водоводах, где перекрытие потока на время очистки сетки недопустимо, применяют вращающиеся сетчатые фильтры, которые представляют собой вращающиеся преграды на пути движения потока, опущенные в воду только на часть своей высоты. Сквозь погруженную секцию фильтра проходит фильтруемая вода. Благодаря непрерывному вращению каждая часть сетки, отработавшая как фильтр, поднимается над поверхностью воды и оказывается под струей воды, поступающей под давлением из системы промывки, после чего опять погружается в воду и служит фильтром, процесс повторяется. Таким образом происходит непрерывная автоматическая промывка сетки, благодаря чему создаются условия для непрерывного действия фильтра с минимальной потерей напора. Затраты труда на обслуживание подобных устройств незначительны. Для промывки таких фильтров требуется значительное количество воды, содержание твердых частиц в промывочной воде высокое.

Вращающиеся сетчатые фильтры бывают двух типов: прямоточные, когда направление движения потока совпадает с осью вращения фильтра, и радиальные, когда поток движется радиально в направлении либо к оси вращения фильтра, либо от нее.

Прямоточные вращающиеся сетчатые фильтры. Существует много разновидностей прямоточных вращающихся сетчатых фильтров. В фильтрующем устройстве, показанном на рис. 13.2, поток поступает из крайней камеры, расположенной слева, и проходит сквозь сетку, установленную таким образом, чтобы направление движения потока совпадало с осью ее вращения. Отработавшая в качестве фильтра часть сетки подни-

мается в результате ее вращения над водой и попадает в зону промывки, где струей воды под высоким давлением, направленной перпендикулярно поверхности сетки в сторону, противоположную движению потока, осуществляется ее очистка от твердых частиц. Промывная вода попадает в специальный желоб, установленный со стороны входа потока в фильтр, и отводится им в сторону.

Прямоточные вращающиеся сетчатые фильтры относительно недороги, просты в эксплуатации, их техническое обслуживание нетрудоемко. Очистка вращающихся сеток почти полностью автоматизирована. Их преимущество по сравнению с неподвижными сетками состоит в том, что они допускают значительно более высокую концентрацию твердых частиц в фильтруемом потоке. Максимальный размер пропускаемых сеткой твердых частиц определяется размером ее ячеек. Стандартный ряд размеров ячеек для вращающихся сеток примерно соответствует стандартам на ячейку неподвижных сеток.

Пропускная способность фильтра зависит от размера ячеек сетки, потери напора, связанной с прохождением потока сквозь сетку, эффективности работы фильтра, степени насыщения потока твердыми частицами и характера этих частиц, а также от площади фильтрации. Выбор размера ячеек определяется допускаемым в данном потоке гидросмеси максимальным размером твердых частиц. Величина потери напора будет зависеть от процентного отношения суммарной площади ячеек к площади фильтрации, степени насыщения потока гидросмеси твердыми частицами и характера этих частиц, эффективности метода очистки сетки, частоты вращения сетки и скорости фильтруемого потока. Для повышения эффективности работы фильтра можно рекомендовать увеличение частоты вращения сетки вплоть до максимального значения, определяемого соображениями целесообразности. Увеличение частоты вращения сетки может компенсировать возрастающую степень насыщения потока гидросмеси твердыми частицами. Это в свою очередь вызывает необходимость увеличения частоты промывки сетки, что способствует уменьшению потери напора на ней. Потери напора на вращающихся сетках при условии их правильного проектирования и грамотной эксплуатации составляют 15—60 см.

Основным недостатком прямоточных вращающихся сетчатых фильтров является то, что они должны быть круглыми. Поскольку глубина потока гидросмеси не может быть значительно больше половины диаметра сетки, диаметр сетки ограничивает поток. С увеличением диаметра вращающейся сетки вес и габариты ее увеличиваются, соответственно требуются более глубокие гидравлические каналы, поэтому при больших фильтруемых расходах следует применять многоступенчатую фильтрацию.

Радиальные вращающиеся сетчатые фильтры. Такой фильтр представляет собой цилиндрический каркас с натянутой на него сеткой. Поступающий поток направлен вдоль оси вращения цилиндра, выходящий — радиально от оси цилиндра к

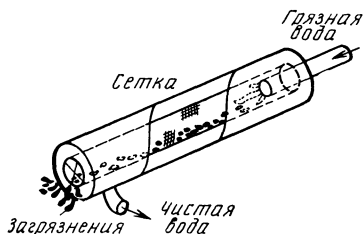


Рис. 13.4. Радиальный вращающийся сетчатый фильтр

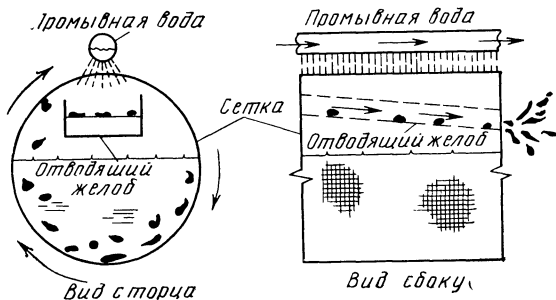


Рис. 13.5. Система обратной промывки в радиальном вращающемся сетчатом фильтре

периферии таким образом, чтобы жидкость прошла сквозь ячейку сетки. На рис. 13.3 и 13.4 показаны два варианта установки фильтрующих устройств рассматриваемого типа. Трубопровод промывной воды находится снаружи цилиндра, наверху. Уровень потока смеси на входе в фильтр поддерживается достаточно низким для того, чтобы внутри цилиндра оставалось место для размещения промывного желоба (рис. 13.5).

На рис. 13.6 показан другой вариант установки радиального сетчатого фильтра. Фильтруемый поток поступает в фильтр радиально, от внешней поверхности сетки к оси цилиндра, а выходит наружу из оконечности цилиндра в осевом направлении. Частицы твердого тела, задержанные у сетки, собираются на внешней поверхности сетки и перебрасываются специальными лопастями через цилиндр. Фильтрами такого типа обычно пользуются для удаления крупных включений, например плавающих кусков дерева или коры, из сравнительно чистой воды. Необходимость промывки сетки в данном случае отпадает, так как захваченные потоком твердые тела отделяются от фильтра под действием собственной силы тяжести.

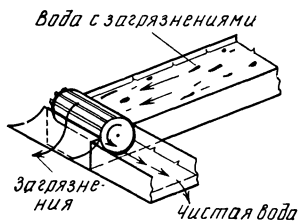


Рис. 13.6. Радиальный вращающийся сетчатый фильтр, предназначенный для извлечения из воды крупного мусора

Обладая всеми преимуществами прямоточных сетчатых фильтров, радиальные сетчатые фильтры не так ограничены по пропускной способности, как прямоточные. Скорость фильтрации через вращающийся сетчатый фильтр для заданных величины потока, размера ячеек и частоты вращения

зависит от площади поверхности сетки. Площадь поверхности в радиальном сетчатом фильтре определяется по формуле

$$A = K\pi DL, \quad (13.1)$$

где A — площадь поверхности фильтрации, м^2 ; D — диаметр цилиндра, м ; L — длина цилиндра, м ; K — площадь поверхности сетки, находящаяся в воде, десятые доли.

Таким образом, пропускная способность радиального сетчатого фильтра пропорциональна его длине и диаметру. Площадь поверхности фильтрации прямооточного сетчатого фильтра зависит только от диаметра, так как он не имеет длины.

Сетки фильтров изготавливают из различных материалов: от оцинкованной стали до всевозможных технических тканей. Материал выбирают, исходя из характеристик фильтруемого потока и желаемого размера ячеек сетки. Например, для фильтрации соленой воды сетка из оцинкованной стали не годится, так как этот материал легко поддается коррозии. Поскольку некоторые мелкоячеистые сетки выпускаются только из определенных материалов, размер ячеек до некоторой степени обуславливает материал.

Для радиальных вращающихся сетчатых фильтров потеря напора 30 см или менее считается нормальной. Более подробно с конструктивными параметрами можно ознакомиться по каталогам фирм-изготовителей. Однако прежде, чем приступить к выбору фильтра, необходимо выяснить и уточнить следующие факторы: максимальный размер частиц, которые может пропускать фильтр, характеристики фильтруемого потока (например, концентрация твердых частиц в гидросмеси и их размер, коррозионные свойства жидкости) и скорость потока. Диапазон размеров ячеек для фильтрующих сеток радиальных фильтров достаточно широк: от нескольких сантиметров до долей миллиметра. Фильтры с мелкоячеистыми сетками называются микрофильтрами или микроситами.

Расчет микрофильтров ведут по формуле, предложенной Бухером (Boucher, 1947):

$$h = \frac{mQh_0}{A} e^{nIQ/s}, \quad (13.2)$$

где e — основание натурального логарифма; h — потеря напора на сетке, см ; Q — расход через фильтр, л/мин ; h_0 — начальная потеря напора, м ; A — эффективная погруженная площадь поверхности сетки, м^2 ; I — фильтруемость, л/м^2 ; s — скорость фильтра (т. е. суммарная эффективная площадь поверхности фильтрующей сетки, опускающаяся в воду в единицу времени, $\text{м}^2/\text{мин}$; m — постоянная, равная $1,1 \cdot 10^{-4}$; n — постоянная, равная $1,86 \cdot 10^{-6}$.

Фильтруемость I — это объем воды, профильтрованной через единицу площади стандартного фильтра, отнесенный к единице площади. Этот параметр из формулы (13.2) труднее остальных поддается определению. Для его определения можно воспользоваться лабораторным методом Бухера (Boucher, 1947) или методикой, применяемой в полевых условиях (ЕРА, 1971). Остальные

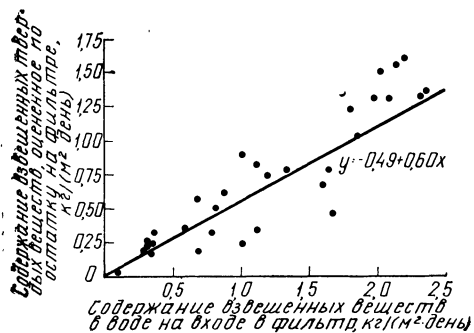


Рис. 13.7. Зависимость количества задержанных твердых примесей от их содержания в фильтруемом потоке для микрофилтра, установленного на водоочистой станции (Lynam et al., 1969)

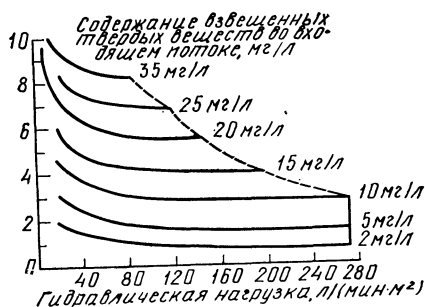


Рис. 13.8. Зависимость содержания твердых примесей в потоке, выходящем из фильтра, от концентрации этих примесей в потоке фильтруемой воды и гидравлической нагрузки (Lynam et al., 1969)

параметры в формуле (13.2) могут изменяться в определенных пределах для достижения требуемой потери напора.

Микрофилтры обычно применяются для окончательной очистки сточных вод. Сведения о применении микрофилтров на предприятиях по разведению водных организмов отсутствуют. Данные, полученные при очистке бытовых сточных вод на водоочистой станции в Чикаго, легли в основу построения графика (рис. 13.7), из которого видно, что количество отфильтрованных твердых примесей прямо пропорционально их содержанию в поступающей на фильтрацию воде. Математическим выражением этого графика является уравнение регрессии

$$y = -0,50 + 0,6x,$$

где y — содержание взвешенных примесей в воде, оцененное по остатку на фильтре, кг/(м²·день); x — содержание примесей в воде, поступающей на фильтрование, кг/(м³·день).

Для построения кривой, показанной на рис. 13.7, необходимы эксперименты. С помощью уравнения регрессии можно получить графики типа показанных на рис. 13.8 для различных значений концентрации взвешенных примесей в воде, подлежащей фильтрации, и расходов. График, приведенный на рис. 13.8, построен по данным полупромышленных испытаний, выполненных на водоочистой станции в Чикаго. С помощью этого графика можно прогнозировать качество фильтрации по изменению содержания примесей в фильтруемой воде и ее расхода. В сочетании с уравнением Бухера графики такого рода можно использовать при расчете микрофилтров. Следует отметить, что форма графиков, показанных на рис. 13.7 и 13.8, зависит от свойств твердых примесей.

Сетчатые филтры конвейерного типа. На рис. 13.9 показана еще одна конструкция вращающегося сетчатого

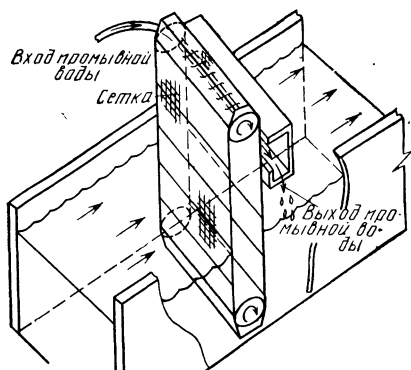


Рис. 13.9. Цепной движущийся сетчатый фильтр

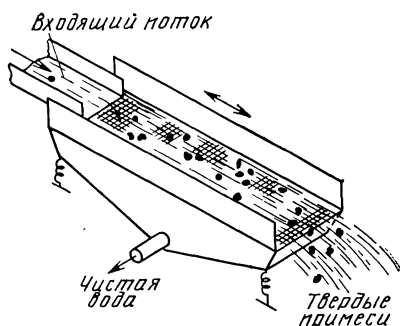


Рис. 13.10. Прямоточный сетчатый фильтр вибрационного типа

фильтра. В этой модели фильтрующие сетчатые пластины, установленные между двумя приводными цепями, образуют пластинчатый конвейер. Фильтруемый поток поступает слева, проходит сквозь сетчатые пластины и выходит с обратной стороны фильтра. Содержащиеся в воде твердые примеси захватываются сетчатыми пластинами на восходящей ветви конвейера. Во время перехода пластин через оборотные звездочки твердые примеси вымываются из них струей промывной воды и попадают на отводящий лоток. Пластинчатая форма конвейера обусловлена необходимостью обеспечить плавный переход приводных цепей через оборотные звездочки. Поскольку зазоры между подвижно соединенными пластинами и в местах соединения пластин с приводными цепями неизбежны, сетчатые фильтры применяются главным образом для извлечения из воды крупных примесей размером 1,25 см и более. Такая конструкция обеспечивает большую поверхность фильтрации без значительных материальных затрат, применяется, когда требуется высокая пропускная способность, например на гидроэлектростанциях.

Минимальный размер частиц, задерживаемых вращающимися сетчатыми фильтрами, обусловлен размером ячеек сетки: чем больше размер ячеек, тем крупнее пропускаемые им примеси. Очистку вращающихся сеток обычно выполняют непрерывной обратной промывкой струей воды под сильным давлением. Поскольку промывная вода теряется для системы, то в некоторых случаях это значительно увеличивает расход воды (например, в замкнутых системах культивирования).

Вращающиеся сетчатые фильтры, как правило, дороже неподвижных, зато они не требуют таких значительных затрат ручного труда. Минимальный размер частиц, улавливаемых сетчатым фильтром вращающегося типа, может достигать 3 мкм. Минимальный размер частиц определяется возможностями обратной промывки, а также предусмотренной скоростью фильтрации.

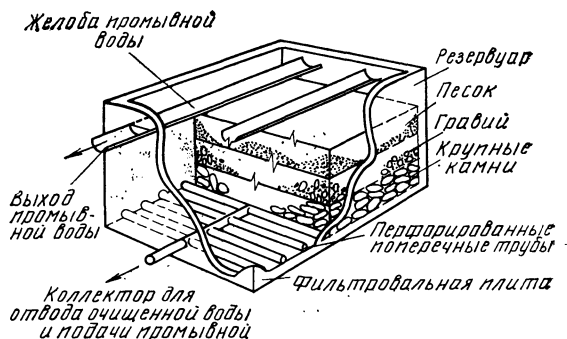
Вращающиеся фильтры просты и надежны в эксплуатации. Пропускная способность фильтров ограничена размером ячеек сеток, а также количеством и характером примесей, содержащихся в фильтруемой жидкости.

Сетчатые фильтры вибрационного типа. Эти фильтры, также предназначенные для извлечения из воды твердых примесей, бывают двух типов: прямоточные и радиальные. В прямоточном сетчатом фильтре вибрационного типа (рис. 13.10) фильтруемая жидкость попадает на сетку фильтра с одной стороны, проходит через нее и выливается через выходной патрубок. Оставшиеся примеси под действием непрерывной вибрации сетки передвигаются вдоль нее и в конце сбрасываются. Сетчатый фильтр установлен на пружинных опорах. В качестве возбудителя вибрации могут быть использованы электромагнитный вибратор, механический привод с эксцентриком или любое другое подходящее для этой цели устройство. Электромагнитный привод обеспечивает постоянные по амплитуде и частоте колебания, хотя в некоторых случаях, если это необходимо, частоту колебаний можно регулировать изменением частоты подаваемого тока. Механический привод обеспечивает колебания как переменные, так и постоянные по частоте и амплитуде.

Круглый радиальный сетчатый фильтр устанавливается таким образом, что отброшенные им частицы распределяются по радиусу от центра круга к его периферии, в то время как очищенная вода под действием собственной силы тяжести проходит через него вниз. Эффективность сетчатых фильтров вибрационного типа зависит от размера ячеек сетки, фильтруемого расхода, частоты и амплитуды вибрации, а также от характера твердых примесей: чем меньше размер ячеек сетки, тем мельче размер отфильтровываемых частиц. При прочих равных условиях увеличение скорости подачи воды на фильтр приводит к увеличению количества задерживаемых фильтром твердых примесей. Выбор оптимальных частоты и амплитуды колебаний сетки должен производиться с учетом конструкции фильтра и характера взвешенных твердых примесей в фильтруемой жидкости. Окончательное решение о величине этих параметров следует принимать в каждом случае отдельно. Подбирая фильтр, лучше всего пользоваться материалами фирмы-изготовителя.

Песчаные фильтры. В песчаных фильтрах механическая очистка воды осуществляется пропусканием ее через слой песка или какого-либо другого зернистого материала. Принцип этого метода фильтрации заключается в том, что частицы взвеси, размер которых превышает размер пор, задерживаются песком. Таким образом, максимальный размер частиц, пропускаемых фильтром, определяется размером частиц песка: чем крупнее частицы песка, тем более крупные примеси могут через него проходить. Размер частиц песка обычно составляет от 2,0 до 0,02 мм. Воду можно фильтровать через крупнозернистый фильтрующий материал, например щебень, уголь, гравий и т. п. В этом случае размер час-

Рис. 13.11. Безнапорный
песчаный фильтр



тиц, составляющих пористую среду, можно увеличивать беспречно. Применяя в качестве фильтрующего материала диатомит, глину и другие подобные материалы, можно добиться значительного уменьшения размера гранул. Однако дальнейшее уменьшение частиц, составляющих фильтрующий слой, влечет за собой чрезмерное уменьшение расхода и применяется поэтому в песчаных фильтрах чрезвычайно редко.

Пропускная способность и скорость засорения фильтра зависят от размера частиц фильтрующего слоя и свойств примесей фильтруемой жидкости. Чем крупнее частицы фильтрующего слоя, тем больше пропускная способность для фильтров одинаковой конструкции, работающих при одинаковой потере напора. Чем больше примесей содержится в поступающем потоке, тем фильтр быстрее засоряется и чаще нуждается в очистке. Поскольку промывная вода сбрасывается, в системе необходимо предусмотреть дополнительное количество воды соответствующего качества для промывки и компенсации потерь.

Безнапорные песчаные фильтры. На рис. 13.11 показан в разрезе безнапорный песчаный фильтр. Вода, содержащая взвешенные примеси, поступает сверху и проходит через фильтрующий слой. Очищенная вода собирается дренажной системой, представляющей собой перфорированную трубу или просто перфорированное дно, и отводится. Работа таких фильтров основана на движении жидкости сквозь фильтрующий слой под действием силы тяжести.

Расход через песчаный фильтр определяется по закону Дарси:

$$v = Kh/d, \quad (13.3)$$

где v — средняя скорость движения потока через песчаный фильтр, м/с; K — коэффициент проницаемости фильтрующего слоя, $\text{м}^3/(\text{с} \cdot \text{м}^2)$; h — напор (т. е. давление), м; d — глубина фильтра, м.

Расход через фильтр находится из уравнения неразрывности

$$Q = Av, \quad (13.4)$$

где Q — расход, $\text{м}^3/\text{с}$; A — площадь поверхности фильтрования, м^2 ; v — средняя скорость течения через фильтр, м/с.

Подставив формулу (13.3) в уравнение (13.4), можно получить следующее выражение для практических расчетов:

$$Q = AKh/d. \quad (13.5)$$

В дальнейшем изложении фильтрация рассматривается с учетом следующих допущений: движение жидкости в пористой среде ламинарное; фильтр насыщен водой; свойства жидкости (например, вязкость и плотность) в процессе фильтрации существенно не изменяются.

Первое допущение соответствует нормальным условиям при безнапорном движении жидкости, а второе удовлетворяется очень легко. Что касается третьего допущения, то на предприятиях по разведению водных организмов фильтруется только вода, а ее температура редко выходит за границы диапазона 5—30 °С. Более того, в гидросистемах предприятий по разведению водных организмов температура воды обычно поддерживается на постоянном уровне с точностью примерно 3 °С. Таким образом, принятие третьего допущения не может привести к серьезной ошибке.

Формула (13.5) удобна для практических расчетов. Однако коэффициент проницаемости K варьирует в зависимости от количества, размера и характера взвешенных частиц, содержащихся в фильтруемой жидкости. Кроме того, каждая промывка фильтра также существенно отражается на величине этого коэффициента. Все эти факторы должны быть учтены при проектировании. Величину K рекомендуется определять в процессе модельных или полупромышленных испытаний. Если модели нет, можно пользоваться постоянным значением K , график промывок фильтра составить таким образом, чтобы коэффициент проницаемости сохранился, по крайней мере, минимальным.

До сих пор описывался песчаный фильтр, состоящий из одного однородного слоя, однако фильтр может состоять из нескольких слоев. Наибольшее распространение получили фильтры, состоящие из трех—пяти слоев, верхний из которых образован самыми мелкими частицами, причем толщина слоев при переходе от слоя мелких частиц к слою более крупных частиц постепенно увеличивается. Например, в верхнем слое фильтра может быть песок, во втором слое — щебень, в третьем — дробленый камень диаметром 1,25 см, а в самом нижнем слое — дробленый камень диаметром 2,5—5 см. Такая конструкция, во-первых, служит опорой слоя песка и, во-вторых, предотвращает засорение отводящих трубопроводов. Поскольку каждый ниже расположенный слой состоит из более крупных частиц, его водопроницаемость будет всегда больше водопроницаемости слоя, находящегося сверху. Следовательно, расход через фильтр определяется водопроницаемостью самого верхнего слоя фильтра, а поскольку размер пор в этом слое минимальный, почти все взвешенные частицы, содержащиеся в фильтруемой жидкости, задерживаются на этом участке. Благодаря этому упрощается очистка фильтра, достаточно промыть водой только его верхний слой. Хорошие результаты да-

ет также и механическая очистка, так как все задержанные фильтром примеси удаляются вместе с верхним слоем песка толщиной около 2,5 см.

Представляет интерес конструкция гравитационного песчаного фильтра, состоящего из нескольких слоев с частицами разного размера, причем самый крупный песок находится сверху. В таком фильтре взвешенные примеси оседают как в верхнем слое, так и в других слоях, включая самый нижний. Во время промывок фильтр обычно сильно разжижают, что облегчает удаление загрязнений. После окончания промывки песок оседает, при этом самые мелкие частицы оказываются наверху, а самые крупные — внизу, что объясняется различной скоростью осаждения частиц разного размера, но одинаковой плотности. Следовательно, чтобы наиболее крупные частицы удержались в верхнем слое, плотность частиц по слоям должна быть различной, причем плотность мелких частиц, образующих нижний слой фильтра, должна быть значительно больше плотности более крупных частиц из верхнего слоя. Фильтры, предназначенные для очистки сточных вод, состоят из трех слоев: самый нижний — мелкий гранит (удельный вес 4,2), над ним — песок (удельный вес 2,65), верхний слой — дробленый антрацит (удельный вес 1,6). Относительное расположение слоев в таком фильтре сохраняется даже после обратной промывки. Для очистки бытовых сточных вод применяются также двухслойные фильтры песок — антрацит (Process Design Manual for Suspended Solids Removal, 1971).

Толщина фильтрующего слоя в песчаных фильтрах, применяемых для очистки бытовых сточных вод, обычно составляет 60—120 см. Данные о работе песчаных фильтров в системах предприятий по разведению водных организмов малочисленны. Обычно толщина фильтрующего слоя, равная 30—90 см, вполне достаточна. На предприятиях по разведению водных организмов песчаные фильтры осуществляют в отдельных случаях и биологическую очистку. Эти вопросы подробно изложены ниже.

Можно было бы установить соотношение между размером гранул песка и минимальным размером частиц, задерживаемых фильтрующим слоем. Однако такое соотношение верно только для чистого песка и воды, не загрязненной примесями. Одновременно с фильтрацией начинается процесс засорения пор в песке и со временем фильтр задерживает частицы взвеси все меньшего размера. Итак, после определенного периода работы способность фильтра к извлечению из фильтруемого потока взвешенных частиц уменьшается и размер отфильтрованных частиц становится меньше, чем в начале работы фильтра.

Допустимый расход через песчаный безнапорный фильтр зависит от размера частиц фильтрующей среды, характеристик входящего потока и допустимой потери напора. В установках для очистки бытовых сточных вод расход принимается равным 82 л/(мин·м²). Однако быстрые песчаные фильтры обеспечивают более высокие расходы, например 410 л/(мин·м). Более высокие

расходы требуют более частых промывок и фильтрующей среды, состоящей из более крупных частиц. Выбор загрузки фильтра для предприятий по разведению водных организмов производится в основном по экспериментальным данным или по результатам испытаний, проведенных на месте. На предприятиях с высокой плотностью посадки, особенно если фильтрация производится без предварительного осветления воды в отстойниках или с недостаточным осветлением, следует применять крупнозернистые песчаные фильтры с размером гранул от 2 до 5 см. При меньшем размере гранул фильтр быстро засоряется, что влечет за собой слишком значительную потерю напора, уменьшение расхода, необходимость частых промывок песка, т. е. лишние водопотери или образование анаэробных зон в фильтре (Hall, 1971; Wheaton, 1975; Lomax, 1976). Даже при наличии предварительного осветления воды в отстойниках рекомендуется пользоваться в песчаных фильтрах крупным песком (диаметр зерен 2 см и более).

Гранулометрический состав песка может задаваться по-разному, чаще всего физическим размером частиц. Широкое распространение получила методика тщательной рассортировки песка с помощью последовательно установленных сит с убывающей ячейей и определения процентного количества материала, задержанного каждым ситом. По полученным данным строят кривую (рис. 13.12). В логарифмическом масштабе те же данные будут

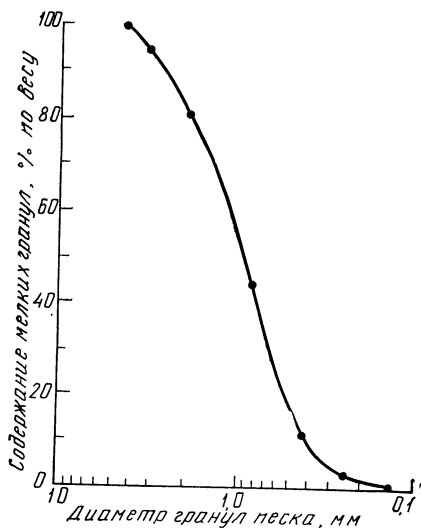


Рис. 13.12. Гранулометрическая кривая песчаного фильтра (Process Design Manual for Suspended Solids Removal, 1971)

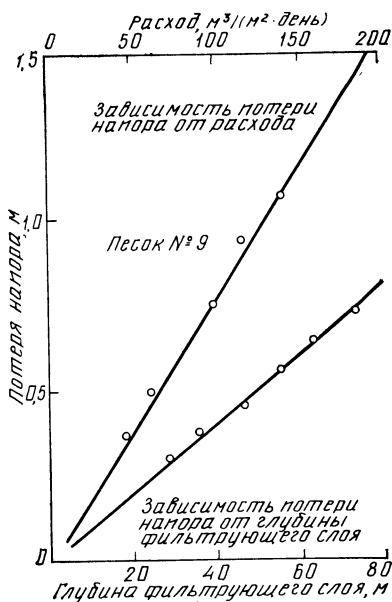


Рис. 13.13. Зависимость потери напора от глубины фильтрующего слоя и расхода для песчаного фильтра (Journal American Water Works Associations, vol. 25)

выражаться для песка различного гранулометрического состава прямыми линиями. На гранулометрической кривой обычно выделяют две основные точки. Диаметр гранул называется эффективным размером, если 10 % гранул по весу имеют диаметр меньше этого эффективного размера. Это 10 %-ное значение выбрано потому, что на величину потери напора в фильтре влияют главным образом более мелкие фракции. Вторая точка — это 60 %-ное значение, т. е. 60 % по весу гранул имеют диаметр меньше эффективного. Отношение диаметра, соответствующего второй характерной точке гранулометрической кривой, к диаметру гранул, соответствующему первой из этих точек, называется коэффициентом однородности: чем больше этот коэффициент, тем менее однородным по размеру фракций является песок.

В табл. 13.1, 13.2 и 13.3 приведены результаты ситового ана-

Т а б л и ц а 13.1. Характеристики экспериментальных сортов песка (Hulbert and Feben, 1933)

Номер песка	Номер сита	Средний диаметр, мм			Коэффициент однородности	Пори- стость, %
		подсчет и взвешивание	микроизмере- ние	размер 50% песка, опре- деленный про- сеиванием		
1	От 48 до 60	0,289	0,297	0,287	1,08	38,7
2	От 42 до 48	0,374	0,386	0,361	1,03	37,0
3	От 35 до 42	0,435	0,426	0,420	1,05	36,7
4	От 32 до 35	0,510	0,523	0,503	1,05	36,3
5	От 28 до 32	0,614	0,601	0,600	1,04	35,8
6	От 24 до 28	0,709	0,690	0,700	1,03	35,4
7	От 20 до 24	0,899	0,908	0,831	1,06	35,3
8	От 16 до 20	0,997		1,025	1,05	35,2

лиза восьми однородных по составу и 16 рассортированных по размерам песчаных грунтов, использованных Халбертом и Фебеном (Hulbert and Feben, 1933) в экспериментах, посвященных определению величины потери напора в песчаных фильтрах. На рис. 13.13—13.15 показаны графики, полученные Халбертом и Фебеном, для чистого песка и чистой воды. Кривые на рис. 13.13 подтверждают линейную зависимость потери напора от толщины фильтрующего слоя и расхода, выведенную Дарси. На рис. 13.14 показаны аналогичные кривые для нескольких песчаных грунтов: при постоянной толщине фильтрующего слоя зависимость между

Т а б л и ц а 13.2. Гранулометрический состав 16 видов песчаных грунтов, использованных в экспериментах (Hulbert and Feben, 1933)

Номер грунта	Место отбора песка	Форма гранул	Размер частиц, в мм, при котором		Коэффициент однородности	Пористость, %
			10% гранул имеют меньший размер	60% гранул имеют меньший размер		
9	Оттава, штат Иллинойс	Круглая	0,324	0,465	1,43	36,1
10	Ред-Уинг, штат Миннесота	Круглая	0,490	0,698	1,42	33,9
11	Фаланкс, штат Огайо	Почти прямоугольная	0,621	0,897	1,44	40,4
12	Кейп-Код, штат Массачусетс	То же	0,491	0,663	1,35	38,9
13	Оттава, штат Иллинойс	Круглая	0,370	0,735	1,99	35,0
14	Кейп-Мей, штат Нью-Йорк	Почти прямоугольная	0,430	0,780	1,81	35,5
15	Фаланкс, штат Огайо	То же	0,416	0,600	1,44	39,9
16	Мускатин, штат Луизиана	»	0,595	0,870	1,46	37,0
17	Оттава, штат Иллинойс	Круглая	0,550	0,830	1,51	34,9
18	Мускатин, штат Луизиана	Почти прямоугольная	0,600	0,987	1,65	36,0
19	Оттава, штат Иллинойс	Круглая	0,540	0,808	1,50	34,7
20	Копли, штат Огайо	Прямоугольная	0,540	0,765	1,42	48,4
21	Оттава, штат Иллинойс	Круглая	0,341	0,544	1,60	34,5
23	Смесь № 15 и 20	Прямоугольная и почти прямоугольная	0,440	0,670	1,52	42,9
24	Смесь № 15 и 20	Прямоугольная и почти прямоугольная	0,479	0,730	1,52	45,6
25	Смесь № 15 и 20	Прямоугольная и почти прямоугольная	0,441	0,660	1,50	41,7

расходом и потерей напора носит линейный характер. Очевидно также, что при одной и той же величине расхода увеличение размера фракций песка приводит к уменьшению потери напора. Средний диаметр частиц песка № 1 равен 0,287 мм, в то время как песок № 8 состоит из частиц со средним диаметром 1,025 мм (см. табл. 13.1). При расходе $100 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{день})$ потеря напора для песка № 1 составляет 1,5 м, в то время как для песка № 8 — только 0,15 м.

На потерю напора в песчаных фильтрах влияет также температура воды (см. рис. 13.15). Как видно из рисунка, с пониже-

Таблица 13.3. Разделение 16 сортов песка с помощью сит, % сырого веса частиц, задержанных ситом (Hulbert and Feben, 1933)

Номер песка	Размер отверстий сита, мм										
	1,356	1,132	0,930	0,746	0,655	0,548	0,461	0,383	0,339	0,243	0,149
9	0	0	0,01	0,09	0,40	8,90	33,70	23,03	20,32	12,21	1,34
10	0,90	1,60	7,00	19,00	22,20	28,05	14,91	3,59	1,62	0,96	1,17
11	9,80	7,80	18,10	27,7	20,0	14,43	1,95	0,06	0,02	0,10	0,04
12	0,50	1,00	4,40	15,90	21,50	31,40	20,14	4,25	0,27	0,60	0,04
13	0	0,60	8,50	29,70	6,60	15,30	18,90	8,07	6,87	4,94	0,52
14	5,90	5,00	14,6	18,2	13,1	12,5	15,8	7,70	4,00	3,16	0,04
15	0	0,10	1,3	12,8	15,3	22,50	29,32	13,17	3,94	1,58	0
16	1,10	4,10	23,30	38,80	17,30	8,70	5,01	0,95	0,20	0,54	0
17	0	0,20	16,00	50,60	8,80	14,66	8,49	0,73	0,15	0,37	0
18	5,50	13,8	33,2	27,4	8,9	3,23	4,55	1,47	0,47	1,48	0
19	0	0,30	13,0	45,3	10,27	19,63	9,95	0,85	0,22	0,48	0
20	0,10	0,20	10,95	33,35	24,8	19,30	9,18	1,52	0,06	0,47	0,07
21	0	0,10	5,40	18,40	4,70	10,90	25,30	14,7	11,06	8,69	0,75
23	0	0,10	5,40	19,5	18,3	22,3	20,70	9,88	2,36	1,40	0,06
24	0	0,30	8,5	27,0	21,6	20,2	14,2	5,63	1,28	1,22	0,07
25	0	0,10	4,50	18,50	18,20	22,80	22,15	10,69	2,16	1,24	0,06
Медианное значение 50% размеров	1,59	1,23	1,02	0,83	0,70	0,60	0,50	0,42	0,36	0,28	0,15

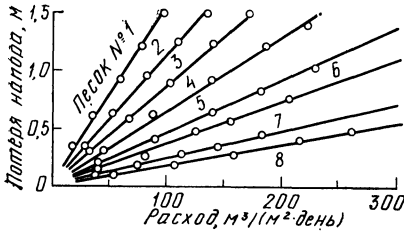


Рис. 13.14. Зависимость потери напора в песчаном фильтре от расхода для нескольких песчаных грунтов (Journal American Water Works Associations, vol. 25)

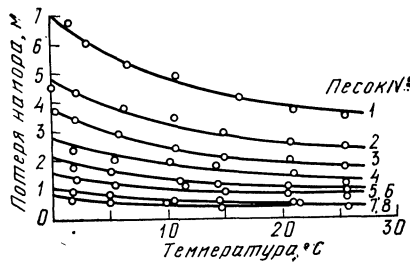


Рис. 13.15. Зависимость потери напора в песчаных фильтрах от температуры для нескольких песчаных грунтов (Journal American Water Works Association, vol. 25)

ем температуры воды потеря напора возрастает, что связано с вязкостью жидкости, которая для воды увеличивается с понижением температуры. Вязкость воды связана с температурой нелинейной зависимостью, поэтому график на рис. 13.15 нелинейный.

Халберт и Фебен (1933) получили эмпирическую формулу потери напора для песчаных фильтров при условии использования чистого песка и чистой воды в качестве фильтруемой. Засорение фильтрующего слоя формулой не учитывается.

$$h = 3,1 \cdot 10^{-3} \left(\frac{dr (69,43 - p)}{S^{1,89} (T + 20,6)} \right), \quad (13.6)$$

где h — потеря напора, см; T — температура воды, °F; S — размер гранул песка, мм; r — расход, м³/(м²·день); d — толщина фильтрующего слоя, см; p — коэффициент пористости [процентное отношение объема пор ко всему объему пористого тела, определяемое нефелометром Джексона (Халберт и Фебен, 1933)].

Поскольку при выведении формулы (13.6) принято было, что фильтруемый поток уже прошел предварительную очистку, а фильтрующий слой представляет собой чистый песок, пористость которого находится в определенных пределах, практическая ценность этой формулы ограничена. Вместе с тем ее довольно просто применять, поскольку d и r выбираются при проектировании, T несложно определить, если известно место расположения фильтра, однако, что же касается p и S , то для определения этих величин существует несколько довольно простых лабораторных методов.

Получение уравнения, аналогичного уравнению (13.6) для песчаного фильтра, работающего с загрязненной водой, содержащей взвеси, весьма желательно, но пока неосуществимо. За неимением такой всеобъемлющей формулы приходится пользоваться менее точными методиками.

При выборе фильтра обычно опираются на результаты, полученные на работающих устройствах. Изложенные здесь данные опираются главным образом на результаты экспериментов, выполненных на Гановерской водоочистной станции в Чикаго. Пользоваться этими данными для фильтров, работающих на предприятиях по разведению водных организмов, следует с осторожностью, тем не менее характер изменения параметров позволяет делать выводы о возможности использования фильтров в системах культивирования, хотя их числовые значения могут быть совершенно другими.

Для Гановерской водоочистной станции зависимость между содержанием взвешенных твердых примесей в воде, оцененным по остатку на песчаном фильтре, и содержанием примесей в воде на входе в фильтр на единицу площади и в единицу времени выражается прямой (рис. 13.16). Выраженные в процентах эти величины будут связаны уже уравнением второй степени (рис. 13.17). Таким образом, при незначительном содержании примесей в воде на входе в фильтр работа песчаного фильтра может оказаться весьма неэффективной, тогда как при концентрации в воде, превышающей определенное значение, процентное количество задерживаемых примесей будет оставаться относительно постоянным.

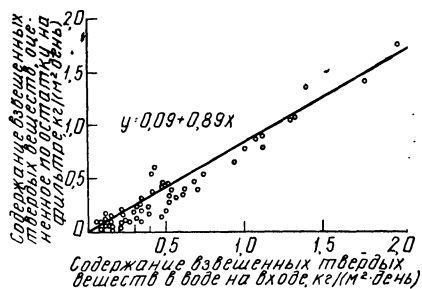
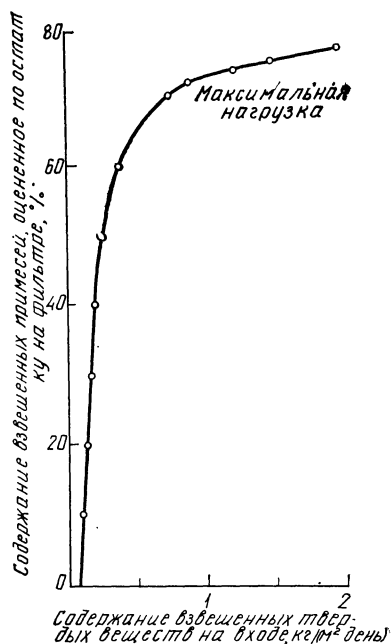


Рис. 13.16. Зависимость между количеством задержанных на фильтре примесей и их концентрацией во входящем в фильтр потоке для песчаного фильтра непрерывного действия при низком напоре и без добавления коагулянтов (Lynam et al., 1969)

Рис. 13.17. Количество (в %) примесей, задержанных песчаным фильтром непрерывного действия. Кривая построена на основании регрессионной зависимости, построенной на рис. 13.16 (Lynam et al., 1969)



Расчет песчаного фильтра следует вести от такого содержания примесей в фильтруемой жидкости, которое соответствует относительно пологому участку кривой процентного содержания взвешенных примесей в воде, оцененному по остатку на фильтре.

Поскольку вместе с водой в фильтр поступают взвешенные в ней примеси, поры фильтра засоряются полностью или частично и поверхность фильтрования уменьшается. Это приводит к увеличению гидравлического сопротивления фильтра и либо к уменьшению расхода, если напор остается постоянным, либо к увеличению напора для сохранения расхода. Увеличение гидравлического сопротивления фильтра зависит одновременно от времени и содержания взвешенных твердых примесей в фильтруемом потоке. Зависимость потери напора от времени и содержания взвешенных твердых примесей в потоке носит полулогарифмический характер, что объясняется периодической промывкой фильтра. На рис. 13.18 и 13.19 представлены кривые, полученные при фильтровании воды на водоочистной станции в Дерби (Великобритания). На рис. 13.20 и 13.21 показана зависимость потери напора от времени для различных по гранулометрическому составу песчаных фильтров, используемых для третичной обработки воды на водоочистной станции в Минуорте под Бирмингемом (Великобритания). При построении кривых, представленных на рис. 13.20, расход был вдвое меньше, чем при построении кривых, приведенных на рис. 13.21. С увеличением концентрации взвешенных частиц в

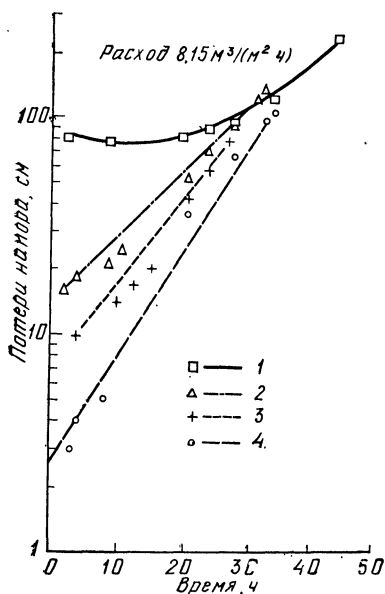


Рис. 13.18. Кривые изменения потери напора во времени, построенные для нескольких песчаных фильтров, подвергавшихся периодической промывке, при постоянном расходе и содержании взвешенных примесей в фильтруемой воде (Oakley and Cripps, 1969):

1 — диаметр 15,2 см, фильтр с восходящим потоком воды; 2 — диаметр 61 см, антрацит — песок — гранит; 3 — диаметр 91,4 см, промышленный песок 7—14; 4 — диаметр 61 см, промышленный песок, 7—14.

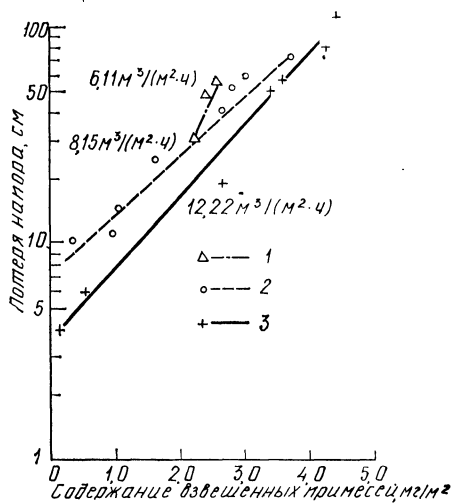


Рис. 13.19. Зависимость потери напора от содержания взвешенных примесей на входе в фильтр для нескольких песчаных грунтов и трех различных скоростей фильтрования (Oakley, and Cripps, 1969):

1 — диаметр 61 см, промышленный песок 7—14; 2 — диаметр 61 см, песок из карьера Лейтон Базард; 3 — диаметр 91,4 см, промышленный песок 7—14

фильтруемой жидкости потеря напора начинает возрастать значительно быстрее. Поскольку кривые зависимости потери напора от времени (13.18—13.21) аппроксимируются уравнением типа уравнения (13.7), увеличение содержания взвешенных примесей в фильтруемом потоке приведет к возрастанию константы b в этом уравнении.

В результате засорение фильтра произойдет значительно быстрее и вызовет необходимость немедленной обратной промывки фильтра, так как продолжение его работы в таких условиях связано с необходимостью увеличения напора для сохранения постоянного расхода

$$y = ae^{bx}, \quad (13.7)$$

где y — потеря напора, м; a и b — константы; x — время, ч.

Эффективность песчаного фильтра возрастает с удлинением периодов между промывками из-за частичного засорения пор.

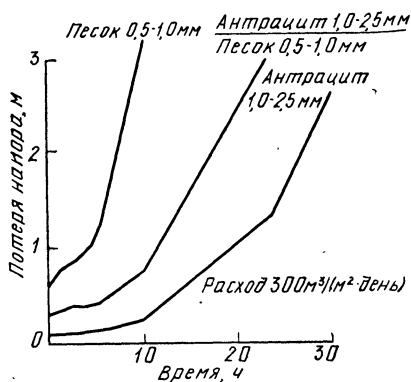


Рис. 13.20. Зависимость потери напора от времени, прошедшего после промывки песчаного фильтра, двухслойного фильтра с фильтрующим слоем, состоящим из песка и антрацита, и для фильтра с фильтрующим слоем из одного антрацита, работавших в системе третичной очистки городских сточных вод («An Investigation into Tertiary Treatment by Rapid Filtration», 1971)

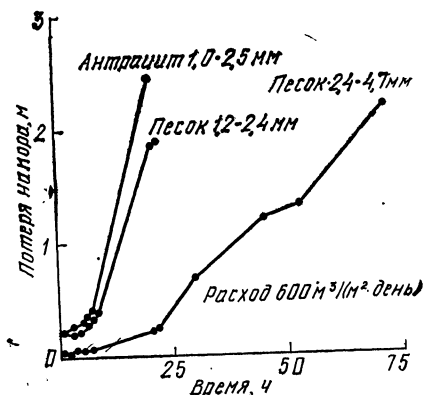


Рис. 13.21. Зависимость потери напора от времени, прошедшего после промывки, для двухслойного песчаного фильтра с фильтрующим слоем из песка разного гранулометрического состава и фильтра с фильтрующим слоем из антрацита, используемых для третичной обработки городских сточных вод («An Investigation into Tertiary Treatment by Rapid Filtration», 1971)

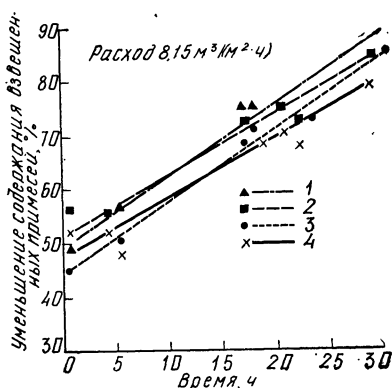


Рис. 13.22. Зависимость содержания взвешенных веществ (в %) в воде, выходящей из нескольких песчаных фильтров, предназначенных для третичной обработки сточных вод, от времени, прошедшего после промывки, при постоянном расходе (Oakley and Cripps, 1969):

1 — диаметр 61 см, антрацит — песок — гранит; 2 — диаметр 15,2 см. фильтр с восходящим потоком воды; 3 — диаметр 61 см, песок из карьера Лейтон Базард 10-14; 4 — диаметр 61 см, промышленный песок 7-14

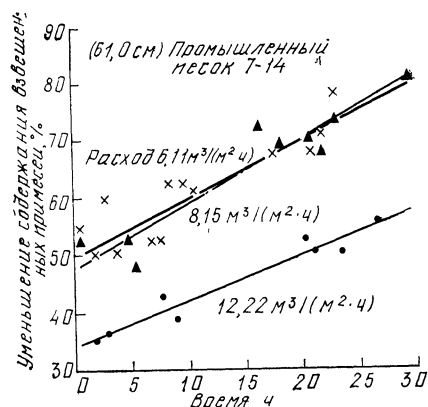


Рис. 13.23. Зависимость количества задержанных фильтром взвешенных примесей (в %) от времени, прошедшего после промывки фильтра при изменяющемся расходе (Oakley and Cripps, 1969)

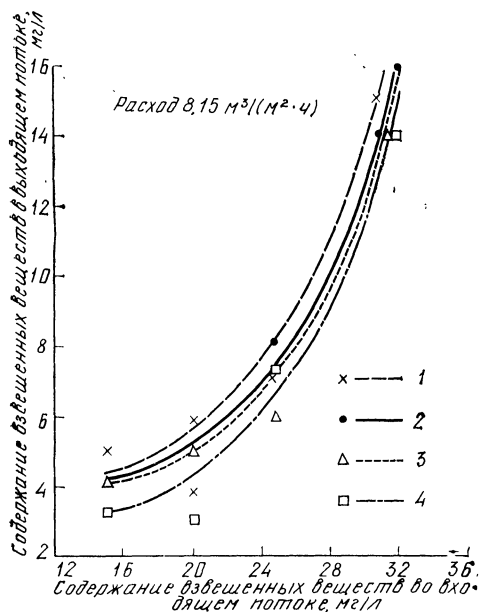


Рис. 13.24. Зависимость концентрации взвешенных примесей на выходе из фильтра от концентрации этих примесей на входе для нескольких песчаных фильтров (Oakley and Cripps, 1969):

1 — 61 см, промышленный песок 7—14; 2 — 61 см, песок из карьера Лейтон Баззард 10—14; 3 — 61 см, антрацит — песок — гранит; 4 — 15,24 см, фильтр с восходящим потоком

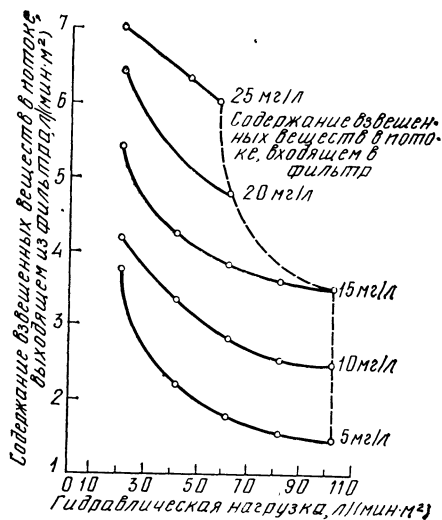


Рис. 13.25. Зависимость концентрации взвешенных примесей в потоке, выходящем из песчаного фильтра, используемого для третичной обработки сточных вод, от гидравлической нагрузки и концентрации взвешенных примесей в поступающей в фильтр жидкости при относительно невысоком напоре. Эти кривые были построены по уравнению регрессии (см. рис. 13.16) (Lynan et al., 1969)

Графики на рис. 13.22 и 13.23 получены для опытных фильтров, работавших на водоочистой станции в Дерби. Они свидетельствуют о линейном характере этой зависимости, по крайней мере для данной установки.

Качество очищенной воды после песчаного фильтра до некоторой степени зависит от качества воды, поступающей в фильтр. Из рис. 13.24 видно, что содержание взвешенных твердых примесей на выходе из фильтра возрастает по мере увеличения загрязнения на входе, однако эта зависимость носит нелинейный характер. На величину допустимой концентрации взвешенных веществ в фильтруемом потоке влияет ряд факторов, в том числе требуемое качество очищенной воды, допустимая частота промывок фильтра, ограничения по потере напора и необходимый расход. Взаимозависимости между этими параметрами могут быть изображены на одном графике (рис. 13.25), что облегчает их анализ. График, изображенный на рис. 13.25, построен по тому же уравнению регрессии, которое было использовано для построения графика,

изображенного на рис. 13.16 для Гановерской водоочистой станции в Чикаго.

С помощью уравнения регрессии можно определить количество удаленных примесей y для любой заданной гидравлической нагрузки x . Гидравлическая нагрузка определяется расходом на единицу фильтрующей поверхности и концентрацией взвешенных веществ в фильтруемой жидкости. Экспериментальные песчаные фильтры, для которых установлена функциональная зависимость количества удаленных примесей от их начальной концентрации, могут быть использованы в качестве моделей для определения эффективности работы более крупных фильтров при различных гидравлических нагрузках и концентрации взвешенных веществ в фильтруемом потоке.

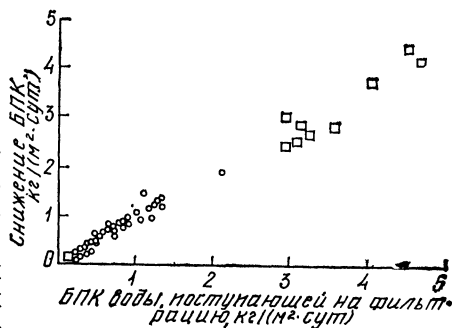


Рис. 13.26. БПК воды при высоких и низких значениях напора без коагулирования (Lynam et al., 1969)

Песчаные фильтры можно применять для снижения БПК (биохимического потребления кислорода) в системах разведения водных организмов. Из рис. 13.26 видно, как уменьшается БПК после очистки воды в песчаных фильтрах Гановерской водоочистой станции в Чикаго. Между БПК в вытекающем потоке и БПК в водяном потоке на входе в фильтр существует прямо пропорциональная зависимость. Однако добиться увеличения фильтрующей способности фильтра можно только за счет большей потери напора. Это позволяет предположить возможность уменьшить БПК на песчаных фильтрах. Степень очистки будет зависеть как от производительности фильтра, потери напора и частоты промывок, так и от характеристик фильтруемого потока. Условия фильтрования в системах по разведению водных организмов не всегда идентичны тем условиям, которые существовали при уменьшении БПК на Гановерской водоочистой станции; ограниченность данных по этому вопросу не позволяет дать какие-нибудь определенные практические рекомендации.

Песчаные фильтры могут также применяться для удаления из воды некоторых видов бактерий. Имеются сведения о биологической очистке бытовых сточных вод, однако данные по удалению бактерий в системах по разведению водных организмов отсутствуют. То же самое относится и к использованию песчаных фильтров для очистки воды от вирусов.

Промывка песчаных фильтров. При промывке фильтра промывная вода подается в направлении, противоположном направлению движения потока во время фильтрации, тем самым с фильтрующей поверхности удаляются уловленные частицы взвеси. Этот процесс обычно сопровождается расширением

фильтрующей зоны фильтра и восстановлением водопроницаемости загрузки. Частота промывок зависит от разных факторов, в том числе от концентрации взвеси в фильтруемом потоке, величины расхода, размера частиц песка, характера загрязнений, допустимой потери напора и, наконец, конструкции фильтра (т. е. числа слоев).

Чтобы промывка была эффективной, фильтрующий слой должен быть разжижен. При этом в результате механического трения между частицами загрузки фильтрующая поверхность эффективно очищается. Для разжижения фильтрующего слоя необходимы более высокие скорости потока, чем при фильтровании. Соответственно система дренирования и трубопровод для промывной воды должны проектироваться с учетом этого условия. Иногда для интенсификации перемешивания частиц песка одновременно с промывной водой подают воздух. Если к этому способу прибегают на предприятиях по разведению водных организмов, то выбирают такой источник воздуха, который по своей конструкции исключает попадание в подаваемый воздух частиц нефтепродуктов.

Скорость потока промывной воды, обеспечивающая ожижение фильтрующего слоя, зависит от размера гранул, их формы и удельного веса, а также вязкости фильтруемой жидкости. Скорость падения отдельных сферических частиц в большом объеме воды можно определить по формуле Стокса

$$v = \frac{2(\rho_p - \rho_f)r^2g}{9\mu}, \quad (13.8)$$

где v — скорость падения частиц, см/с; ρ_p — плотность частиц, г/см³; ρ_f — плотность жидкости, г/см³; r — радиус частиц, м — вязкость, дин·с/см²; g — ускорение силы тяжести, см/с².

На рис. 13.27 приведены две кривые, одна из которых построена по формуле Стокса для частиц с удельной плотностью 2.60 и воды температурой 10 °С, а другая — по данным Хазена, полученным в тех же условиях, что и данные Стокса, но для песчинок неправильной формы. Как видно из рисунка, формула Стокса справедлива лишь для мелких частиц диаметром менее 0,2 мм. Песчаные гранулы, диаметр которых превышает это значение, уже не являются строго сферическими, поэтому формула Стокса не дает правильного представления о скорости падения реальных частиц твердого тела в жидкости, что и было обнаружено Хазеном.

Гранулы песка в ожиженном слое нельзя рассматривать просто как отдельные частицы взвеси в неограниченном количестве воды, поскольку здесь частицы соударяются и взаимодействуют по-иному. Кроме того, поскольку действительная площадь поперечного сечения ожиженного слоя меньше поперечного сечения поверхности фильтрования из-за смещения гранул, следовательно, скорости промывной воды в ожиженном фильтре могут оказаться выше предполагаемых. В связи с этим график, построенный Хазе-

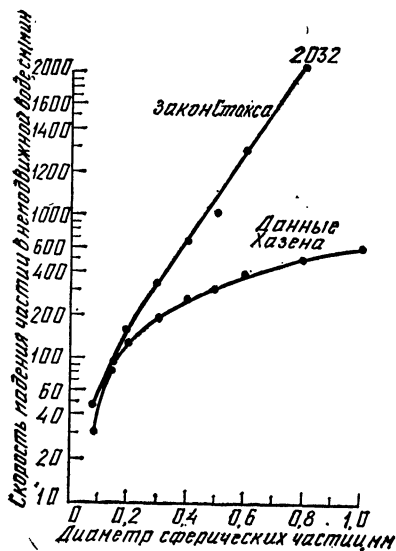


Рис. 13.27. Скорость падения твердых частиц сферической формы (закон Стокса) и гранул песка (данные Хазена) в неподвижной воде при температуре 10°C (Journal American Water Works Associations, vol. 25)

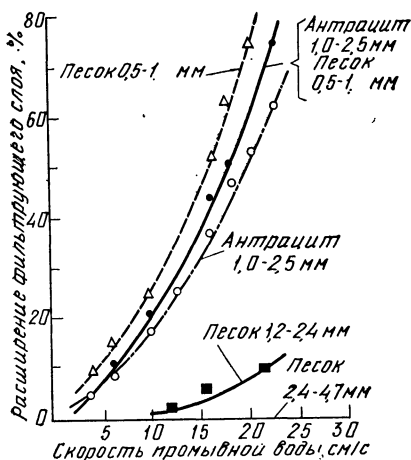


Рис. 13.28. Зависимость увеличения объема фильтрующего слоя от скорости потока промывной воды для нескольких песчаных фильтров («An Investigation into Tertiary Treatment by Rapid Filtration», 1971)

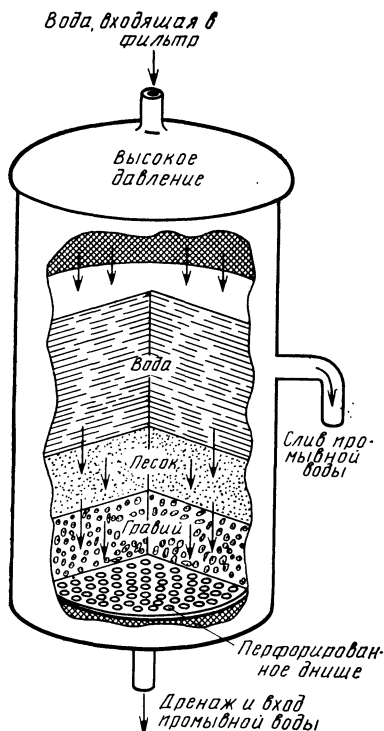


Рис. 13.29. Принципиальная схема напорного песчаного фильтра

ном, также не может служить для предварительного определения скорости, необходимой для оживления фильтрующего слоя. Для решения этой задачи лучше всего использовать лабораторный метод, при котором поток пропускается через несколько различных по гранулометрическому составу фильтров. По полученным экспериментальным данным определяют размер гранул, который

обеспечивает сочетание приемлемых значений потери напора, расхода, качества очищенной воды и интервалов между промывками. Одновременно определяют и расход промывной воды. Расчет дренажной системы и сливных желобов проектируемого фильтра также ведут по данным лабораторных испытаний.

При промывке объем фильтрующего слоя увеличивается, так как он находится во взвешенном состоянии. В установках для фильтрования бытовых стоков обычно предусматривается увеличение объема фильтрующего слоя во время промывок на 25—50 %. На рис. 13.28 приведен график зависимости увеличения объема фильтрующего слоя от гранулометрического состава песка и скорости подачи промывной воды. Характер этой зависимости, как видно из кривых, нелинейный. С увеличением скорости воды объем фильтрующего слоя увеличивается быстрее. Зависимость носит нелинейный характер. Кроме того, при одном и том же расходе промывной воды слой, состоящий из крупных гранул, меньше расширяется, чем слой мелкого песка. Плотность частиц также влияет на способность фильтрующего слоя к расширению.

При проектировании песчаных фильтров вначале определяют на основе имеющейся информации диапазон изменения таких параметров, как размер песчаных гранул, фильтруемый расход, допустимый размер взвеси в потоке, расход промывной воды и т. д. На следующем этапе проектирования проводят лабораторные исследования с фильтрами-моделями для установления оптимальных параметров проектируемого фильтра. В экспериментальных установках трубка, имитирующая фильтр, должна иметь диаметр не менее 7,6 см, чтобы исключить влияние стенок. Проектируемый фильтр должен рассчитываться с учетом возможных колебаний фильтруемого расхода в пределах, обусловленных техническим заданием. После введения в эксплуатацию возможно дальнейшее уточнение некоторых параметров, например частоты промывок, что в конечном итоге обеспечит достижение максимальной производительности.

Напорные песчаные фильтры. Напорные фильтры (рис. 13.29) по конструкции аналогичны безнапорным и отличаются от последних только тем, что они встроены в герметичный сосуд. Вода проходит через фильтр под напором, создаваемым насосами. Напор в напорных фильтрах значительно больше, чем в безнапорных, соответственно возрастает фильтруемый расход. Под действием большего напора частицы взвеси глубже проникают в толщу фильтрующего слоя, что позволяет лучше использовать загрузку фильтра. Основным преимуществом напорных фильтров перед безнапорными является меньший размер при одинаковом расходе. Однако эксплуатация напорных фильтров, так же как и их установка, обходится дороже, так как в системе должны быть предусмотрены насосы. При одних и тех же условиях фильтрования качество очистки в тех и других фильтрах одинаковое. Как правило, песчаные фильтры применяются для очистки воды от примесей размером до 30 мкм (Spotte, 1970).

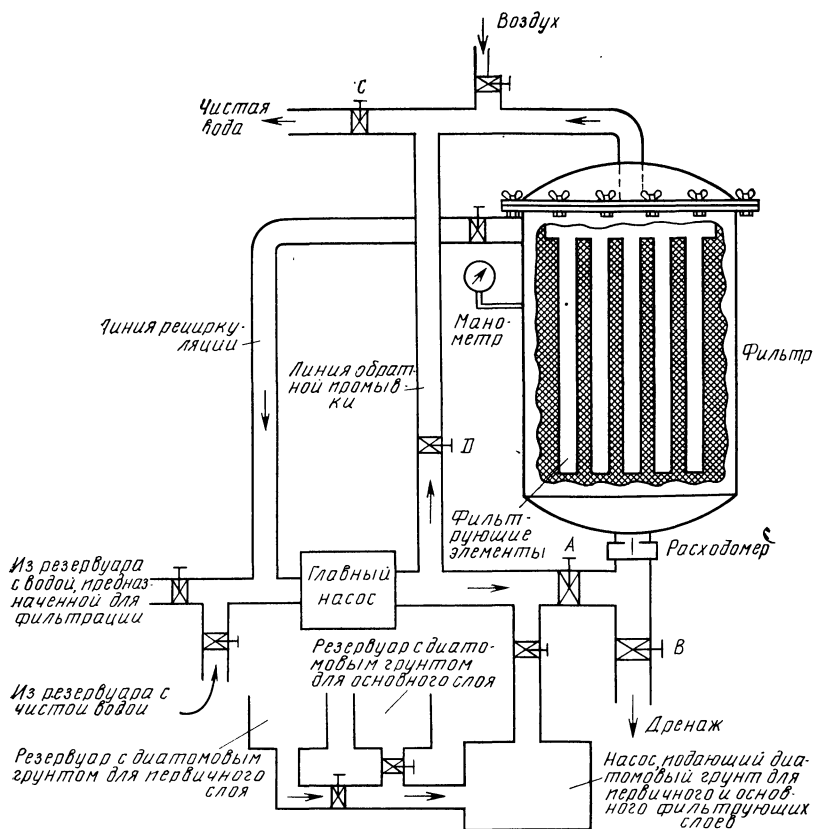


Рис. 13.30. Принципиальная схема диатомового фильтра

Вакуумные песчаные фильтры. По конструкции эти фильтры сходны с безнапорными, отличие заключается в том, что вода откачивается из-под фильтра; при этом у дна бассейна образуется частичный вакуум. Увеличение напора в вакуумных песчаных фильтрах зависит от создаваемого вакуума.

Диатомовые фильтры. По способу очистки воды диатомовые фильтры относятся к механическим. Они предназначены для очистки воды от содержащихся в ней взвешенных примесей и снижения количества бактерий. Существует очень много различных диатомовых фильтров, некоторые диатомовые порошки позволяют отфильтровывать частицы размером до 0,1 мкм (Purchas, 1967).

На рис. 13.30 показан напорный диатомовый фильтр, состоящий из нескольких фильтрующих элементов. Фильтрующий элемент представляет собой рукав из мелкоячеистой сетки или фильтрующей ткани, натянутой на сердечник. На рукав наносится диатомовый грунт, через который и осуществляется собственно фильтрование. На рис. 13.31 показан рукав с нанесенным на него

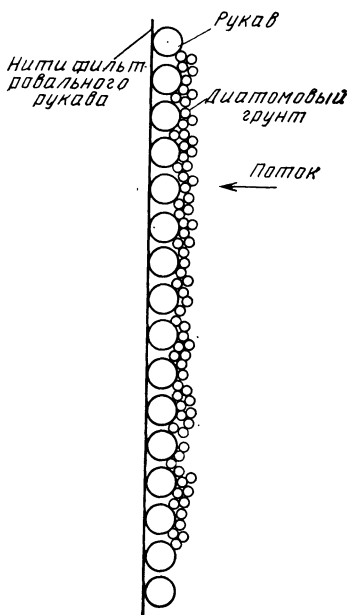


Рис. 13.31. Схематический разрез фильтровального рукава

слоем диатомового грунта. Нити материала, из которого соткан рукав, показаны крупными кружками, вокруг которых группируются мелкие кружки — частицы диатомового грунта. Из рисунка видно, что, хотя максимальное расстояние между волокнами ткани рукава составляет всего 0,0127 см, частицы диатомового грунта еще меньше. Чтобы между двумя соседними волокнами ткани рукава образовался мостик, необходимо несколько частиц грунта. Поскольку первые частицы, осевшие на рукав, не всегда образуют необходимые мостики, значительная часть фильтрующего материала попадает в процессе грунтовки в воду, которую необходимо сливать.

Фильтр работает следующим образом (см. рис. 13.30). Чистая вода подается основным насосом из резервуара в нижнюю часть фильтра. Количество прошедшей воды регистрируется расходомером. Необходимое количество сухого диатомового порошка разводят в воде до образования суспензии, которую затем подают в специальный бак-смеситель, откуда она насосом подается в основную линию. Грунтовку производят до тех пор, пока все рукава не будут покрыты слоем фильтрующего материала требуемой толщины. Это условие обеспечивается при достаточной скорости движения воды в фильтре. Если диатомовый порошок состоит из крупных частиц, скорость потока должна быть не меньше 1,37 м/мин (Bell, 1962). Таким образом, скорости движения потока внутри фильтра должны быть достаточно высокими, чтобы частицы диатомового порошка находились во взвешенном состоянии (эта скорость зависит от размера частиц, грунта, их формы и плотности), но достаточно низкими для предотвращения проскакивания частиц, так как к концу грунтовки скорость увеличивается.

На 1 м² фильтровальной поверхности требуется примерно 4 — 6,25 г диатомового порошка (Mc Indoe, 1969). Потеря напора на рукаве, полностью покрытом слоем диатомового грунта, составляет приблизительно 8—10 дарси* (Bell, 1962). Неоднородность грунтовки по толщине вызовет колебания скорости по всей поверхности фильтра и снизит эффективность фильтрования.

Как уже отмечалось, значительная часть диатомового грунта

* Проницаемость, равная 1 дарси, допускает расход 1 мл/с (вязкость жидкости 1 сП) через 1 см² материала толщиной 1 см при разности давлений $9,8 \cdot 10^4$ Па.

проходит через ткань рукава в воду. Эти потери значительно сокращаются, если фильтр работает в замкнутом режиме (см. рис. 13.30). Для включения рециркуляционного контура закрывают выходную задвижку и открывают задвижку на рециркуляционной линии. Поскольку вместе с водой в рециркуляционной линии движутся частицы диатомового грунта, увеличивается износ главного насоса. В тех случаях, когда это необходимо и экономически целесообразно, для уменьшения износа главного насоса циркуляционную линию делают обводной. В такой схеме должно быть использовано сопло Вентури, которое встраивается в рециркуляционную линию на участке трубопровода, специально суженного для этой цели.

По окончании нанесения фильтрующего слоя бак-накопитель суспензии отключают и включают в сеть бак, в котором находится диатомовый порошок, предназначенный для подпитки слоя грунта. На этом этапе рециркуляция не требуется, так как из фильтра выходит достаточно чистая вода. Главный насос должен быть переключен с подачи чистой воды на подачу загрязненной воды, предназначенной для фильтрации. Во время этого переключения подача воды не должна прерываться, поскольку в случае остановки насосов слой грунтовки начинает осыпаться. Если это все же произойдет, грунтовку следует повторить.

Для подпитки основного фильтрующего слоя используют специально подобранный диатомовый порошок, который подается в фильтр вместе с фильтруемой водой. Без подпитки частицы взвеси, содержащиеся в воде, очень быстро закупорили бы поры фильтрующего слоя. Незначительные добавки диатомового порошка поддерживают эффективность фильтровального «пирога».

Продолжительность цикла фильтрования зависит от падения давления на фильтре или от толщины фильтрующего «пирога». Добавляемый в процессе подпитки грунт и задержанные на фильтре частицы взвеси увеличивают толщину «пирога». При правильном выборе сорта диатомового порошка и его количества для данного фильтра падение давления на фильтре в процессе работы хотя и будет расти, но в допустимых пределах. Для предотвращения падения давления, превышающего допустимое, грунтовку необходимо заменять. Фильтрующие элементы расположены на определенном расстоянии один от другого. В процессе работы фильтра это расстояние уменьшается, так как толщина фильтрующего «пирога» увеличивается. В определенный момент скорость движения воды между фильтрующими элементами настолько возрастает, что фильтрующий слой начинает разрушаться и качество фильтрации ухудшается. В этом случае фильтр также необходимо менять.

Об окончании цикла фильтрации свидетельствует повышенное падение давления на фильтре или увеличение толщины фильтрующего слоя. Промывка начинается с подключения к фильтру трубопровода чистой воды, для этого закрывают задвижку А на входной линии фильтра, открывают задвижку дренажа В, закры-

вают задвижку C на трубопроводе чистой воды и открывают задвижку D на линии обратного тока. В результате чистая вода направляется в верхнюю часть фильтра и пропускается сквозь него сверху вниз, в дренаж. Одновременно с промывкой можно продувать фильтры воздухом. Во время промывки направление движения жидкости меняют на противоположное. В результате слой диатомового грунта и задержанные им примеси удаляются. После промывки цикл можно повторять.

Эффективность работы диатомовых фильтров зависит главным образом от трех факторов: площади поверхности фильтрующих элементов, типа применяемого диатомового грунта и свойств жидкости, предназначенной для фильтрования. Расходы в диатомовых фильтрах колеблются от 0,42 до 0,63 л/(мин·м²) (McIndoe, 1969). Однако в диатомовых фильтрах, применяемых для тонкой очистки воды, возможны расходы и 1,2 л/(мин·м²).

Проектирование и выбор диатомовых фильтров. Диатомовые фильтры могут работать в двух режимах. Первый характеризуется экспоненциальной зависимостью между потерей напора на фильтре и продолжительностью фильтрования

$$h = Ae^{Bt}, \quad (13.9)$$

где h — потеря напора, м; A и B — константы; t — время, с; e — основание натурального логарифма.

Уравнение (13.9) описывает работу диатомового фильтра без подпитки или при незначительной подпитке. При таком режиме цикл фильтрования непродолжителен, и вообще такой режим работы фильтра нежелателен.

Другой режим работы характеризуется линейной зависимостью между потерей напора на фильтре и продолжительностью его работы:

$$h = C + Dt. \quad (13.10)$$

Константа C определяет потерю напора на фильтре в начале его работы (т. е. $t=0$). Константа D определяет угол наклона прямой линии на графике зависимости h от t . С увеличением интенсивности подпитки D уменьшается. Благодаря этому увеличивается продолжительность цикла работы фильтра до момента, когда падение давления на фильтре превысит допустимое, при условии, что расстояние между фильтрующими элементами достаточно для увеличения толщины фильтрующего слоя. Отсюда можно сделать вывод о необходимости увеличения количества диатомового грунта, предназначенного для подпитки, тем не менее экономические соображения, а также фильтруемый расход ограничивают содержание диатомового порошка в фильтруемой воде 10% (по весу) (Purchas, 1967). На рис. 13.32 приведена зависимость между расходом фильтруемой воды и расходом диатомового порошка.

Бауманн и др. (Baumann et al., 1962) разработали теорию диатомовых фильтров. Позднее Бауманн и Оулман (Baumann

Рис. 13.32. Зависимость между расходом в диатомовом фильтре и количеством диатомового порошка для образования основного фильтрующего слоя, выраженным в процентах веса взвешенных примесей, содержащихся во входящем в фильтр потоке (Purchas, 1969)

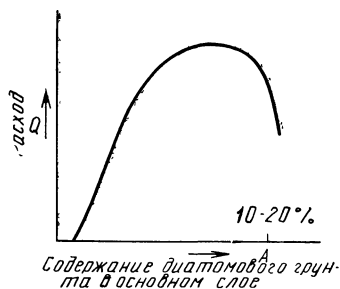
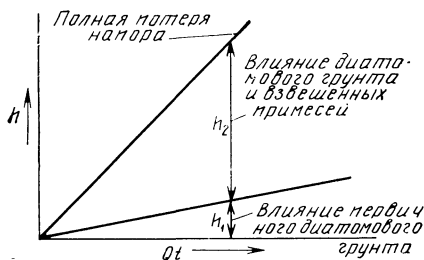


Рис. 13.33. График расчета α_2 (Journal American Water Works Association, vol. 54)



and Oulman, 1964) использовали эту теорию для определения зависимости вязкости от температуры. Теория Бауманна и др. (1962) справедлива только для фильтров, действие которых описывается уравнением (13.10). В окончательном виде это уравнение имеет следующий вид:

$$h = 3,2 \cdot 10^{-8} \frac{\mu Q}{g \gamma} \left[\alpha_1 w_1 + \alpha_2 \frac{C_0 Q t \gamma}{10^6} \right], \quad (13.11)$$

где h — потеря напора на фильтре, м; μ — абсолютная вязкость жидкости, Па·с; Q — скорость фильтрации (расход воды), $\text{м}^3/(\text{с} \cdot \text{м}^2)$; g — ускорение силы тяжести, $\text{м}/\text{с}^2$; γ — удельный вес жидкости, $\text{Н}/\text{м}^3$; α_1 — среднее удельное сопротивление вспомогательного первичного слоя, $\text{м}^2/(\text{Н} \cdot \text{с})$; α_2 — среднее удельное сопротивление грунтовки и взвешенных твердых частиц, $\text{м}^2/(\text{Н} \cdot \text{с})$; w_1 — количество диатомового порошка, использованного при грунтовке, $\text{Н}/\text{м}^2$; C_0 — концентрация диатомового порошка, $\text{мг}/\text{л}$; t — время, с.

Если температура воды известна, значения μ и γ для уравнения (13.11) берутся из таблиц. Ускорение силы тяжести g также известно. Значение w_1 можно подсчитать, разделив вес взятого диатомового порошка на площадь поверхности фильтрующего элемента.

Среднее удельное сопротивление грунтовки α_1 определяют опытным путем. Поскольку величина α_1 относится только к потоку, проходящему через грунтовку, первая часть уравнения (13.11) может быть переписана следующим образом:

$$h_1 = 3,2 \cdot 10^{-8} \frac{\mu Q}{g \gamma} (\alpha_1 w_1). \quad (13.12)$$

С помощью уравнения (13.12) величину α_1 можно определить несколькими способами. При заданной температуре величины μ , γ и g являются константами, а параметры Q и w_1 могут из-

меняться. Переписав уравнение (13.12) в виде уравнения (13.13), можно показать, что график зависимости h_1 от $Q\omega_1$ представляет прямую линию, величина наклона которой равна $C\alpha_1$. С можно подсчитать, а α_1 найти по графику зависимости h_1 от $Q\omega_1$:

$$h_1 = C\alpha_1 Q\omega_1, \quad (13.13)$$

где C — константа, равная $3,2 \cdot 10^{-8}$ ($\mu/\text{г}\gamma$).

Существует, по крайней мере, четыре экспериментальных способа определения тангенса угла наклона кривой зависимости h_1 от $Q\omega$: 1-й — изменяя Q , поддерживать постоянным ω_1 и следить за изменением h_1 ; 2-й — изменяя ω_1 при постоянной величине Q , следить за изменением h_1 ; 3-й — поддерживать постоянным h_1 и определять Q для различного содержания диатомового порошка в фильтрующем слое ω_1 ; 4-й — для различных значений содержания диатомового порошка ω_1 следить за изменением потери напора на фильтре при изменяющейся Q . Первые два способа можно применять для стандартных диатомовых фильтров; третий и четвертый способы применяются в основном в лабораторных установках. Во всех случаях, разумеется, следует пользоваться чистой водой и диатомовым грунтом, не бывшим в употреблении.

После того, как найдено α_1 , тем же способом можно определить α_2 . Для этого можно воспользоваться графиком зависимости h от Qt , вводя поправку на влияние грунтовки (рис. 13.33). Наклон кривой общей потери напора включает потерю напора в слое грунтовки и в фильтрующем слое, образовавшемся в результате подпитки и накапливания взвешенных частиц. Тангенс угла наклона этой кривой, равный h_2/Qt , можно использовать для определения α_2 :

$$h_2 = \alpha_2 \frac{C_0 \gamma}{10^6} Qt. \quad (13.14)$$

Таким образом, тангенс угла наклона h_2/Qt равен $\alpha_2(C_0\gamma/10^6)$. Поскольку C_0 и γ известны, можно найти α_2 .

Теперь, зная α_1 и α_2 , можно воспользоваться уравнением (13.11) для определения характеристик фильтра при различных значениях температуры, расхода диатомового порошка для грунтовок и подпитки и других эксплуатационных параметров.

Фильтрующая способность диатомовых фильтров. Спотт (Spotte, 1970) установил, что самые тонкие фракции диатомовых фильтров способны улавливать частицы взвеси размером менее 0,1 мкм. С помощью диатомовых фильтров можно также извлекать из воды бактерии. Крупнозернистый диатомовый порошок задерживает около 50 % колиформных бактерий, если в поступающей воде они содержались в количестве от 210 до 1300 кишечных палочек на 100 мл. Более мелкие фракции порошка способны полностью очищать воду от кишечных палочек, даже если в поступающей в фильтр воде содержится несколько тысяч кишечных палочек на 100 мл (Hunter and Henderson, 1966). Диатомовые фильтры задерживали 100 % амебных цист и

частично некоторые другие болезнетворные организмы (McIndoe, 1969). Внесение в зараженную бактериями воду солей железа с последующим извлечением железа в результате взаимодействия MgO с диатомовым грунтом позволяет уменьшить содержание патогенных стрептококков и кишечной палочки *Escherichia coli* на 99 % (McIndoe, 1969).

ГРАВИТАЦИОННОЕ РАЗДЕЛЕНИЕ

Принцип этого метода очистки состоит в том, что для извлечения из воды взвешенных веществ используется сила тяжести. Плотность воды и взвешенных примесей различна (плотность взвеси, разумеется, больше), поэтому частицы взвеси падают в столбе покоящейся жидкости. Ниже рассмотрены три способа гравитационного разделения: в отстойниках, центрифугах и гидроротационных. Каждый из них можно рекомендовать для применения на предприятиях по разведению водных организмов для извлечения из жидкости взвешенных примесей.

Отстаивание. Отстаивание основано на том, что в покоящейся жидкости или при малых скоростях ее течения взвешенные вещества под действием силы тяжести оседают на дно. В простейших отстойниках отстаивание происходит только под действием силы тяжести. Для увеличения скорости осаждения взвешенных веществ в воду добавляют химические или другие вещества, которые способствуют агрегированию частиц взвеси. Этот процесс называется коагулированием. И третий связанный с отстаиванием процесс — осаждение, заключающийся в добавлении в воду химических веществ, в результате чего образуются нерастворимые соединения.

Ускоряющая сила F_1 элементарной частицы в столбе жидкости пропорциональна разности плотностей частицы и среды:

$$F_1 = (\rho_p - \rho_f) pV, \quad (13.15)$$

где F_1 — ускоряющая сила, Н; ρ_p — плотность частицы, $кг/м^3$; ρ_f — плотность жидкости, $кг/м^3$; g — ускорение силы тяжести, $м/с^2$; V — объем частицы, $м^3$.

На твердую частицу, движущуюся в среде, действуют также сила сопротивления среды и выталкивающая сила. Выталкивающая сила среды учитывается в уравнении (13.15) разностью плотностей частицы и среды. Сила сопротивления среды F_2 пропорциональна вязкости μ , плотности среды, скорости падения частицы и ее диаметру:

$$F_2 = v_s^2 d^2 \rho_f \theta(Re), \quad (13.16)$$

где v_s — скорость осаждения частицы, $м/с$; d — диаметр частицы, $м$; Re — число Рейнольдса; $\theta(Re)$ — функция Рейнольдса.

Функция Рейнольдса — это коэффициент сопротивления среды C_s , его величина зависит от числа Рейнольдса и формы частицы. Если в уравнение (13.16) ввести коэффициент сопротивления и

заменить d^2 величиной проекции площади частицы A_c на плоскость, перпендикулярную направлению осаждения, а ρv_s^2 заменить $\rho v_s^2/2$, уравнение примет следующий вид:

$$F_2 = \frac{C_d A_c \rho f_s^2}{2}. \quad (13.17)$$

Поскольку для частицы, падающей в столбе жидкости с постоянной скоростью, сила сопротивления равна ускоряющим силам, уравнения (13.15) и (13.17) можно приравнять:

$$(\rho_p - \rho_f) g v = \frac{C_d A_c \rho f_s^2}{2}. \quad (13.18)$$

Решение уравнения (13.18) относительно v_s дает

$$v_s = \left[\frac{2g}{C_d} \left(\frac{\rho_p - \rho_f}{\rho_f} \right) \frac{V}{A_c} \right]^{1/2}. \quad (13.19)$$

Уравнение (13.19) описывает свободное падение разрозненных частиц под действием силы тяжести. Для частного случая осаждения сферических частиц при ламинарном режиме обтекания ($Re < 0,5$) оно аппроксимируется уравнением Стокса

$$v_s = \frac{gd^2(\rho_p - \rho_f)}{18}. \quad (13.20)$$

Коэффициент сопротивления из уравнения (13.19) зависит от числа Re ; приближенно C_d для чисел Рейнольдса до 1 определяется из следующего уравнения:

$$C_d = \frac{24}{Re}. \quad (13.21)$$

Полученное выражение является, по существу, формулой Стокса. Выведенное для $Re \leq 1$, оно подтверждает справедливость формулы Стокса для этого режима. При больших числах Рейнольдса вплоть до $1 \cdot 10^4$ коэффициент C_d сопротивления для сферических частиц может быть аппроксимирован следующим уравнением (Fair et al., 1968):

$$C_d = \frac{24}{Re} + \frac{3}{(Re)^{1/2}} + 0,34. \quad (13.22)$$

Уравнение (13.19) описывает падение разрозненных частиц в достаточно большом объеме жидкости, исключающем соприкосновение частиц между собой и со стенками контейнера. Файер и др. (Fair et al., 1968) установили, что соприкосновение частиц приобретает значение, если концентрация ила, мелких твердых частиц или выделившегося в осадок карбоната кальция достигает 6600 мг/л. В сточных водах это соприкосновение начинает сказываться уже при концентрации взвесей приблизительно 2600 мг/л

Рис. 13.34. Секции прямоугольного отстойника

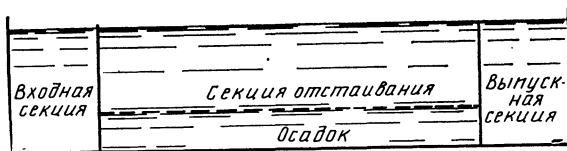
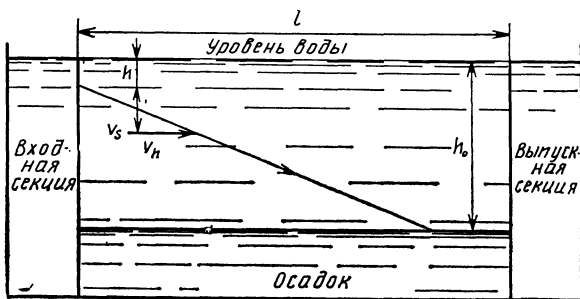


Рис. 13.35. Осаждение взвешенных частиц в прямоугольном отстойнике



(Fair et al., 1968). Из-за соприкосновения частиц скорость их осаждения уменьшается, поэтому теоретическую скорость осаждения умножают на поправочный коэффициент.

Эффективность отстойников. Отстойник представляет собой резервуар, разделенный на четыре секции (рис. 13.34): входную секцию, секцию, в которой происходит осветление воды, выходную секцию и секцию для сбора осадка. Входная секция отстойника предназначена для уменьшения турбулентности и входной скорости потока с таким расчетом, чтобы они соответствовали условиям, необходимым в секции осаждения. При переходе потока из входной секции в секцию осаждения его течение должно быть ламинарным и равномерным по всей площади поперечного сечения отстойника. Наибольший эффект дает отстаивание воды при низких скоростях и ламинарном режиме течения. Выходная секция отстойника обеспечивает переход от низких скоростей движения жидкости в отстойнике к относительно высоким скоростям на выходе из него. Последняя секция отстойника предназначена для временного хранения выпавших в осадок взвешенных веществ.

В идеальном отстойнике режим течения жидкости ламинарный. При таком режиме частица, вошедшая в секцию отстаивания слева (рис. 13.35), проходит по прямой. Траектория движения частицы представляет собой векторную сумму осаждения частицы v_s и горизонтальной скорости потока v_H . Если v_0 — скорость осаждения частицы, достаточная для того, чтобы она прошла при своем падении расстояние по вертикали h_0 за время t_0 , равное времени удержания частицы в отстойнике, тогда любая частица, движущаяся со скоростью $v_s \geq v_0$ будет выпадать на дно в горизонтальном отстойнике. Кроме того, некоторое число частиц будет поступать в резервуар со скоростью $v_s \leq v_0$ ниже уровня поверхности h . Чтобы достичь поверхности осадка, эти частицы должны

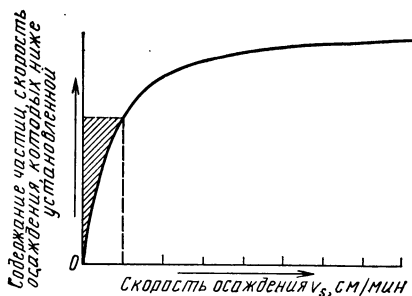


Рис. 13.36. Относительное количество частиц, падающих со скоростью, меньшей или равной скорости оседания v_0 , установленной для данного отстойника

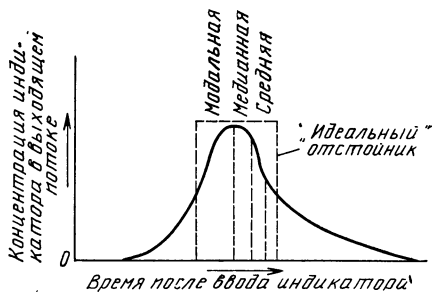


Рис. 13.37. Зависимость концентрации красящего вещества-индикатора на выходе из фильтра от времени как показатель вихреобразования в отстойнике

пройти расстояние по вертикали, равное $h_0 - h$. Таким образом, они тоже успевают выпасть в осадок за время своего пребывания в отстойнике t_0 . Доля этих частиц в осадке может быть выражена как

$$r_1 = \int_0^{r_0} \frac{v_s}{v_0} dr, \quad (13.23)$$

где r_0 — число частиц, двигающихся со скоростью $v_s < V_0$.

Следовательно, общее число частиц, выпавших в осадок, можно определить по формуле

$$r = (1 - r_0) + \frac{1}{v_0} \int_0^{r_0} v_s dr. \quad (13.24)$$

Формулой (13.24) можно пользоваться при расчете отстойника. Для этого выполняют серию экспериментов с колонкой сточной жидкости. Отбирают образцы осветленной жидкости с разных уровней и за различные промежутки времени. Анализируя образцы, определяют количество твердых примесей, выпавших в осадок на известной глубине и в заданный промежуток времени. После обработки опытных данных получают информацию об относительном содержании в общей массе частиц, падающих со скоростью, равной или превышающей скорости из опытного ряда значений. В результате может быть получен график типа показанного на рис. 13.36. Заштрихованная часть графика — это правая часть уравнения (13.23) или вторая половина правой части уравнения (13.24). Полученные в процессе лабораторных испытаний данные могут быть также использованы для определения r_0 и первой половины правой части уравнения (13.24).

Чеснесс и др. (Chesness et al., 1975, в) применяли уравнение (13.24) при проектировании отстойника для очистки отработан-

ной воды из канала с сомиком-кошкой. Для модельного резервуара длиной 86 см эффект разделения составлял 48,5 и 37,9 %. Определенный по результатам экспериментов эффект разделения для этого же резервуара составил 57,0 и 41,3 % соответственно — достаточно хорошая сходимость между расчетной и действительной эффективностью. Однако для модели отстойника длиной 223,5 см, предназначенного для очистки той же воды, расчетный эффект разделения составил 84,5 %, а действительный — всего 57,3 %. Такое расхождение действительных и расчетных данных в длинном резервуаре было приписано неодинаковой скорости осаждения в опытной и реальной установках более мелких частиц взвеси.

В открытых отстойниках возникают завихрения, которые нарушают ламинарный режим и снижают эффективность процесса осаждения. Эти завихрения вызываются изменениями плотности, приповерхностными ветрами, а также условиями на входе и выходе жидкости. Обычно влияние этих завихрений учитывается в расчетной формуле характеристическим коэффициентом:

$$\frac{y}{y_0} = 1 - \left(1 + \frac{nv_0}{Q/A}\right)^{-1/n}, \quad (13.25)$$

где y/y_0 — относительное количество частиц со скоростью осаждения $v_s \geq v_0$, которые оседают в горизонтальном отстойнике; n — характеристический коэффициент отстойника; v_0 — скорость осаждения частиц, проходящих по вертикали расстояние h_0 за время t_0 пребывания в резервуаре; Q — расход на входе в отстойник; A — площадь поверхности отстойника.

При $n=0$ уравнение (13.25) приобретает следующий вид:

$$\frac{y}{y_0} = 1 - \exp\left(-\frac{v_0}{Q/A}\right). \quad (13.26)$$

Характеристический коэффициент n изменяется от 0 до 1, причем нулевое значение соответствует оптимальной конструкции отстойника. Томас и Арчибальд (Thomas and Archibald, 1952) нашли, что значение n приближается к отношению разности между средним и модалным временем движения жидкости вдоль отстойника к среднему времени протекания жидкости (рис. 13.37). Продолжительность движения жидкости вдоль отстойника измерялась с помощью окрашивающих веществ, радиоактивных меток и по солесодержанию воды (см. ниже). К сожалению, n можно определить лишь для нового отстойника, что ограничивает применение уравнения (13.25).

Для значений $v_0/(Q/A)=1$, y/y_0 оказалось равным только 63 %, а не 100, как ожидалось. Это расхождение при условии, что $n=0$, обусловлено действием течений в отстойнике. Таким образом, отстойник должен рассчитываться на скорость перелива, равную 100/0,63 расчетной (Fair et al., 1968).

Вихреобразование и установившийся режим. Идеальным для работы отстойника является ламинарное течение. Однако на практике при увеличении скорости движения частицы

плавность обтекания нарушается, струйки срываются, появляются завихрения. Такое явление называется вихреобразованием. Для изучения этого явления в поток вводят красящее вещество, соль и т. д. Результаты такого исследования могут быть представлены в виде графика (см. рис. 13.37).

Для теоретически идеального отстойника (т. е. без завихрений) зависимость концентрации от времени характеризуется ступенчатой функцией (пунктирная линия на рис. 13.37). Среднее медианное и модальное значения концентрации в этом случае будут равны между собой. Для реальных отстойников эта зависимость выражается сплошной линией (см. рис. 13.37). Модальное, медианное и среднее значения концентрации на этой кривой соответствуют разным значениям времени. Как видно из графика, отношение времени, соответствующего модальному или медианному значению концентрации, к времени, соответствующему среднему значению концентрации, всегда меньше единицы и может служить основой для сравнения отстойников различных конструкций. Чем ближе этот коэффициент к единице, тем меньше объем «мертвых» зон в отстойнике. В мертвых зонах вода фактически остается неподвижной и осаждения частиц не происходит. Следовательно, чтобы определить действительное время пребывания воды в отстойнике, необходимо из общего объема отстойника вычесть объем «мертвой» зоны и эту разность поделить на фильтруемый расход. Отношение разности между значениями времени, соответствующими средней и модальной или средней и медианной концентрациям, к значению времени, соответствующему средней концентрации вещества-индикатора в вытекающей из фильтра воде, может служить критерием вихреобразования в отстойнике: чем больше отношение, тем больше вихреобразование.

Поскольку в пограничном слое между эффективной и мертвой зонами отстойника существует небольшое перетекание жидкости, последние порции вещества-индикатора будут выходить с большой задержкой. Действительно, правая часть кривой на рис. 13.37 сильно вытянута. Таким образом, длинные ветви кривой свидетельствуют о медленном обмене между эффективной и «мертвой» зонами отстойника.

Повторные эксперименты с красящим веществом для одного и того же отстойника должны давать сходные кривые. Если кривые значительно различаются по форме при экспериментах с одной и той же жидкостью, это означает, что отстойник работает нестабильно и его параметры нельзя определить с достаточной точностью.

Конструкция отстойников. Конструкции отстойников значительно различаются по форме и размерам. Наиболее широкое распространение получил горизонтальный прямоугольный отстойник, самоочищающийся или требующий промывки. Вода поступает в отстойник с одной стороны (рис. 13.38), а выходит с другой. Днище горизонтальных отстойников может иметь или не иметь уклон. Уклон может быть устроен в любом направ-

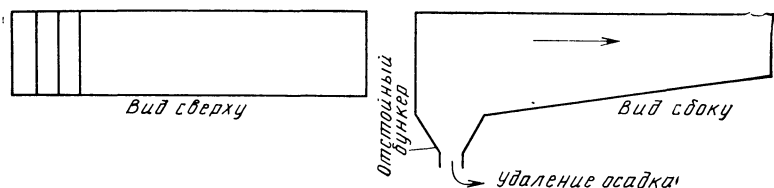


Рис. 13.38. Схема горизонтального отстойника прямоугольного сечения

лении. Иногда днище горизонтального отстойника имеет уклон к прямку, расположенному в середине отстойника; накопившийся в отстойнике осадок периодически удаляется. В отстойниках с плоским дном или с незначительным уклоном дна предусматривается автоматическое удаление накопившегося осадка: для этой цели может быть использована, например, цепная драга, захватывающая осадок и передающая его в бункер для временного хранения, откуда он вымывается по мере накопления.

Применяются также радиальные отстойники, в которых осветляемая жидкость движется от центра к периферии. Осадок, выпавший на дно, сгребается к центру вращающимися скребками, подвижно укрепленными в дне резервуара, откуда и удаляется в дренаж.

Применяются также и вертикальные отстойники. Они представляют собой круглый в плане, иногда квадратный резервуар с коническим днищем. Осветляемая вода подводится снизу и сливается уже осветленной через борт. В этих отстойниках в осадок выпадают только те частицы, скорость осаждения которых превышает вертикальную скорость поднимающейся вверх жидкости.

Эффективность отстойников в значительной степени зависит от характера течения воды в каждой из четырех его секций и от взаимного влияния режимов течения, установившихся в разных секциях. Например, если скорость в нижней части отстойника окажется слишком высокой в результате нарушения требуемых условий во входной секции, осадок может снова перейти во взвешенное состояние. Гидравлические параметры входной и выходной секций отстойника должны обеспечивать максимально спокойные условия течения в секции отстаивания.

Данные, необходимые при проектировании отстойников для предприятий по разведению водных организмов, весьма ограничены. Рекомендуемая продолжительность пребывания воды в отстойнике составляет 15—60 мин (Liao et al., 1972; Lomax, 1976). Отстаивание воды в отстойниках способствует уменьшению ХПК, БПК (биохимическое потребление кислорода) и количества взвесей в отработанной воде систем по разведению водных организмов, однако для выполнения требований, предъявляемых к качеству воды, рециркулирующей в системах по разведению водных организмов, одного только осветления недостаточно. Например, при осветлении в экспериментальном отстойнике воды, поступающей из канала, в котором содержался сомик-кошка, Чеснесс и др. (1975в)

обнаружили, что только 6 % взвешенного органического вещества могут быть удалены таким способом. Для ускорения процесса осаждения в воду можно добавлять соли алюминия и другие коагулянты, однако стоимость этих реагентов такова, что процесс осветления становится экономически невыгодным (Chesness et al., 1975a).

Отстойные центрифуги. Основное преимущество отстойников этого типа — увеличенная скорость осаждения частиц, которая достигается путем увеличения испытываемой частицами силы тяжести за счет ускорения в центрифуге. Существует много типов центрифуг (табл. 13.4), каждый тип характеризуется определен-

Т а б л и ц а 13.4. Типы и характеристики различных центрифуг (Trowbridge, 1962)

Тип	Максимальное значение множителя для величины g
Гравитационное осаждение	1
Центрифуга со шнековой подачей	2000—4000
Центрифуга дискового типа	5000—8000
Центрифуга в виде трубы	12000—60000
Ультracентрифуга	200000—300000
Центрифуга Сведберга	900000
Центрифуга Хьюгенарда	7500000

ным диапазоном величины множителя для g (т. е. числа, показывающего, во сколько раз центробежная сила превышает нормальную силу тяжести). Промышленностью освоены центрифуги периодического и непрерывного действия, однако для очистки отработанной воды на предприятиях по разведению водных организмов, как правило, применяются только аппараты непрерывного действия.

Падение твердых частиц в гравитационных отстойниках происходит в условиях достаточно низких чисел Рейнольдса, так что для этого режима справедлива формула Стокса (т. е. течение жидкости ламинарное). Процесс осаждения частиц в центробежном отстойнике также может соответствовать закону Стокса. Однако поскольку форма реальных частиц взвеси значительно отличается от сферической (при удельном весе 2,8 их размер превышает 10 мкм, а центробежная сила — в 10000—50000 раз силу тяжести), формула Стокса лишь приблизительно описывает этот процесс. В связи с этими новыми условиями изменяется число Рейнольдса, происходит переход от ламинарного движения к турбулентному, что противоречит одному из главных допущений, лежащих в основе закона Стокса (формула 13.27):

$$v_s = \frac{gd^2(\rho_p - \rho_l)}{18\mu}, \quad (13.27)$$

где v_s — скорость осаждения, м/с; g — ускорение силы тяжести, м/с²; d — диаметр частиц, м; ρ_p — плотность частиц, кг/м³; ρ_l — плотность жидкости, кг/м³; μ — абсолютная вязкость, кг/(м·с).

В центрифуге вместо ускорения силы тяжести действует центробежное ускорение A_c :

$$A_c = \omega^2 R, \quad (13.28)$$

где ω — угловая скорость, рад/с; R — радиус центрифуги, м.

Подстановка формулы (13.28) в уравнение (13.27) дает следующее выражение, которое описывает процесс падения твердых частиц сферической формы в центрифуге при ламинарном режиме течения в процессе осаждения в соответствии с принятыми при выведении этого уравнения допущениями.

$$v_s = \frac{\omega^2 R d^2 (\rho_p - \rho_l)}{18\mu}. \quad (13.29)$$

Разумеется, частицы сферической формы весьма редко встречаются в реальных условиях. Тем не менее уравнением (13.29) можно пользоваться для решения практических задач, так как оно позволяет произвести вполне обоснованную предварительную оценку. Эта предварительная оценка уточняется контрольными испытаниями на реальной отработанной воде и консультациями с фирмами-изготовителями.

На рис. 13.39 показано поперечное сечение центрифуги непрерывного действия. Поток осветляемой воды входит с правой стороны и проходит сквозь центральную часть аппарата. В результате вращения жидкость отбрасывается к стенкам центрифуги, где продолжает двигаться влево. Твердые частицы взвеси коническим винтовым шнеком выносятся в противоположном направлении. Поскольку взвесь тяжелее жидкости, ее частицы, отброшенные к стенкам центрифуги, остаются на них до тех пор, пока их не подберет винтовой шнек, чтобы вынести из центрифуги с правой стороны. Осовое расстояние между местом, где втекающий поток ударяется о стенку, и местом, где происходит выброс твердого осадка, — это длина участка, на котором осуществляется обезвоживание осадка.

Эффективность работы центрифуги зависит от частоты ее вращения, пропускной способности по воде и взвеси и глубины отстойника. Глубина отстойника — это глубина слоя воды, образовавшегося вдоль стенок центрифуги. Обычно она регулируется специальным устройством (см. рис. 13.39). С увеличением глубины отстойника качество очистки ухудшается. Это и понятно, поскольку чем больше глубина слоя, тем больший путь должны пройти частицы взвеси при осаждении. Если скорость жидкости в отстойнике постоянна, время осаждения частиц и испытываемые ими ускорения остаются неизменными, в то время как глубина слоя осаждения частиц увеличивается. С увеличением фильтруемого расхода степень восстановления или прозрачность осветляемой жидкости уменьшается, так как в этом случае уменьшается время

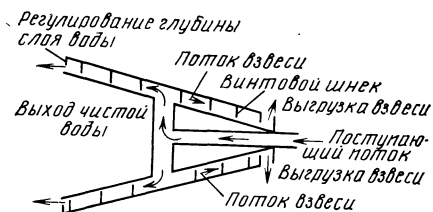


Рис. 13.39. Схема конической шнековой центрифуги непрерывного действия

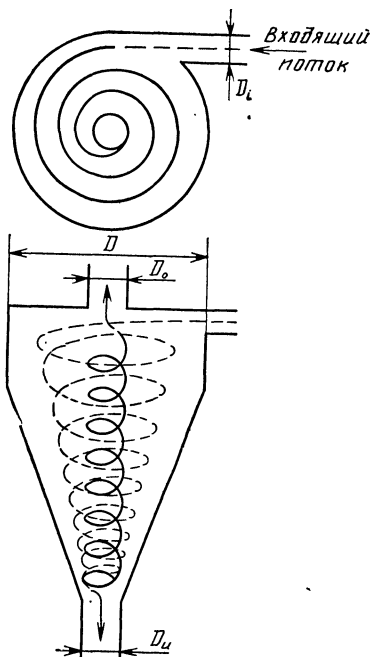


Рис. 13.40. Принципиальная схема действия гидроциклона

осаждения частиц. Увеличение частоты вращения центрифуги улучшает качество очистки воды, поскольку при этом скорость осаждения частиц увеличивается. Увеличение скорости подачи взвеси отрицательно отражается на прозрачности вытекающей из отстойника воды, поскольку эффективность работы аппарата снижается (Echenfelder, 1969).

Целесообразность выбора отстойной центрифуги для разделения жидкости и взвешенных веществ на предприятиях по разведению водных организмов необходимо обосновать экономически, с учетом капитальных и эксплуатационных затрат и возможных преимуществ. Эхенфельдер (Echenfelder, 1969) приводит данные, согласно которым энергозатраты на эксплуатацию центрифуги, работающей в системе очистки городских сточных вод, составляют примерно 0,197 кВт/(л·мин). Перчес (Purchas, 1971) подсчитал, что для центрифуги дискового типа понадобится от 0,04 до 0,14 кВт/(л·мин), а энергозатраты на центрифугу со шнековой подачей составят примерно 0,1 кВт/(л·мин). К сожалению, аналогичной информации для предприятий аквакультуры нет, и для ее получения необходимы специальные исследования.

Гидроциклоны. На рис. 13.40 показаны основная схема и принцип действия гидроциклона. Осветляемая вода подводится в гидроциклон сверху тангенциально и образует спираль. В результате вращения более тяжелые взвешенные частицы выносятся наружу к стенкам гидроциклона. Винтообразный поток движется

сверху вниз вдоль стенки гидроциклона и снизу вверх в его центральной части. Между этими двумя спиралями образуется промежуточный слой, в котором вертикальная скорость равна нулю. Установлено, что диаметр этого слоя равен $D/2,3$ (см. рис. 13.40) (D — внутренний диаметр гидроциклона) (Purchas, 1971).

В центре спирали, поднимающейся снизу вверх, образуется область низкого давления, которая заполняется воздухом или парами жидкости. Образование такого ядра свидетельствует о стабильности режима гидроциклона. Обычно ядро имеет цилиндрическую форму, диаметр ядра может возрасти с увеличением частоты вращения (или пропускной способности) вплоть до максимального значения 0,06—0,33. Производительность гидроциклона зависит от его диаметра, диаметров патрубков, падения давления и свойств жидкости. Считается, что для нормальной работы гидроциклона падение давления не должно превышать 35 кПа, однако на практике гидроциклоны работают в диапазоне падения давления от 140 до 350 кПа (Bradley, 1965).

Осветленная вода поднимается по спирали в верхнюю часть аппарата и выливается из него. Этот поток называют верхним. Частицы взвеси и некоторая часть втекающей в аппарат жидкости в зависимости от конструкции гидроциклона и рабочего режима выходят из нижней части аппарата, этот поток называется нижним.

Изменением условий на выходе нижнего потока можно регулировать рабочий режим гидроциклона. При свободном вытекании нижнего потока разделение жидкости и взвеси будет максимальным. Вытекающий поток превращается на выходе в водяную пыль под действием воздуха, поступающего из центрального вихря. Дросселирование нижнего потока приводит к увеличению содержания в нем взвешенных примесей, которые на выходе могут образовать вращающийся поток взвеси. Сужением выходного потока можно добиться увеличения концентрации взвеси в нем, но при этом ухудшаются условия разделения в гидроциклоне. Повышенное содержание взвешенных примесей в осветляемой воде приведет к прекращению вращения взвеси на выходе из гидроциклона, и эффективность разделения резко уменьшится.

Эффективность разделения в гидроциклоне определяется «граничной точкой» или «выходом». Граничной точкой называют минимальный размер частиц, извлекаемых из верхнего потока. Выход — это весовое содержание твердых взвешенных частиц в нижнем потоке, выраженное в процентах весового содержания взвеси во входящем потоке. Переход гидроциклона от режима нулевого разделения к режиму 100 %-ного разделения при одинаковом размере частиц характеризуется S-образной кривой (рис. 13.41). Крутизна этой кривой зависит от конструкции гидроциклона, свойств жидкости и взвеси, а также от рабочих характеристик. Размер частиц, от которых зависит эффективность разделения, является функцией тех же переменных. Более крупные гидроциклоны имеют большую производительность, а удаляемые ими

частицы взвеси мельче, чем у гидроциклонов меньшего диаметра.

Для расчета циклона при проектировании предложена следующая формула (Bradley, 1965):

$$\frac{d_{50} D_c}{D_i^2} = \frac{3 (0,38)^n}{\alpha} \left[\frac{\mu D_c (1 - R_f)}{Q (\rho_s - \rho_l)} \operatorname{tg} \frac{\theta}{2} \right], \quad (13.30)$$

где d_{50} — размер частиц, при котором эффективность разделения равна 50 %; D_c — наружный диаметр цилиндрической части гидроциклона; D_i — внутренний диаметр подводящего патрубка; n — показатель степени R в выражении $v R^n = \text{const}$; R — радиус гидроциклона; α — коэффициент скоростных потерь на входе в гидроциклон, равный v_c/v_i ; v_c — тангенциальная скорость на стенке цилиндра гидроциклона; v_i — тангенциальная скорость на входе в гидроциклон; μ — абсолютная вязкость; R_f — частное от деления расхода нижнего потока на расход верхнего потока; Q — фильтруемый расход гидроциклона; ρ_s — плотность твердых частиц; ρ_l — плотность жидкости; θ — угол, которым задается конусность гидроциклона.

Уравнение (13.30) слишком громоздко, чтобы им можно было пользоваться при проектировании. Кроме того, в инженерной практике редко возникает необходимость проектирования гидроциклона, поскольку они выпускаются специализированными фирмами. Обычно необходимо только указать область применения гидроциклона, характеристики осветляемой воды, требуемую производительность и некоторые другие параметры и сделать заказ. По этим данным фирма либо сразу подбирает необходимую конструкцию, либо, если такой нет, приступает к проектированию нового гидроциклона в соответствии с заданными условиями.

Эффективность гидроциклона определяется главным образом центробежной силой, развиваемой в аппарате. Поскольку центробежная сила в свою очередь зависит от частоты вращения и радиуса гидроциклона, режим течения на входе в гидроциклон и выходе из него, его радиус и пропускная способность играют важную роль в формировании рабочих характеристик аппарата. В гидроциклонах диаметром 30 см центробежная сила может достигать 2500 г, диаметром 7,6 см — 10000 и диаметром 10 мм — 70000 г (Purchas, 1971). Из-за конической формы гидроциклона центробежная сила изменяется по его высоте. Несмотря на значительные центробежные силы, эффект разделения в гидроциклоне ниже, чем в большинстве промышленных центрифуг. Это объясняется сравнительно непродолжительным пребыванием частиц в аппарате и относительно большей глубиной слоя, через который они должны пройти во время осаждения.

Несмотря на достаточно широкое распространение в промышленности, гидроциклоны весьма редко применяются на предприятиях по разведению водных орга-

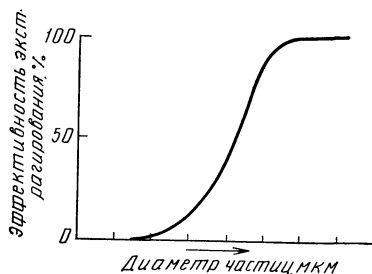


Рис. 13.41. Зависимость эффекта разделения от размера частиц для гидроциклона

низмов. К преимуществам гидроциклонов относятся низкая стоимость и относительная компактность. Их можно использовать для разделения жидкостей, а также для извлечения из жидкостей твердых частиц различных размеров. Основным недостатком гидроциклонов следует считать необходимый высокий перепад давления, что связано с увеличением расходов на перекачивание. Это обстоятельство наряду с недопониманием возможностей гидроциклонов объясняет ограниченность их применения на предприятиях по разведению водных организмов.

ХИМИЧЕСКИЕ ФИЛЬТРЫ

Химические фильтры — это в основном адсорберы. Адсорбция — поглощение поверхностью твердого тела какого-либо компонента из газа или жидкости. При очистке отработанных вод адсорбция обычно происходит либо на поверхности раздела между жидкостью и твердым телом, например между активированным углем и водой, или между ионообменной смолой и водой, либо на поверхности раздела между жидкостью и газом, например между воздухом и водой при пенном фракционировании.

Поверхностная избыточная концентрация. Поскольку адсорбция — это поверхностное явление (т. е. происходящее на поверхности или на поверхности раздела), на нее значительное влияние оказывают реакции и свойства поверхности. Если каплю воды поместить на чистую вошеную поверхность, то образуется не тонкая пленка, а капельки. Когезионные силы между молекулами воды больше адгезионных сил между водой и воском или между молекулами воздуха и воды, поэтому вода сжимается, и образуются капельки. Неуравновешенная сила стремится сжать воду для уменьшения площади поверхности. Адгезионная сила между молекулами воды или иной жидкости на поверхности раздела называется поверхностным натяжением, уменьшить которое можно путем добавления в воду некоторых растворимых веществ. Вещества, уменьшающие поверхностное натяжение жидкости, называются смачивающими или поверхностно-активными веществами; к таким веществам относятся хорошо известные детергенты. Благодаря большему притяжению между молекулами воды, чем между водой и поверхностно-активным веществом, последнее будет аккумулироваться на границе раздела или на поверхности. В приведенном выше примере концентрация поверхностно-активного вещества на границе раздела воздух — вода уменьшает количество энергии, необходимое для увеличения площади поверхности капельки, что позволяет капелькам разлиться и образовать пленку.

В 1878 г. Гиббс вывел уравнение, связывающее концентрацию на поверхности, во много раз превышающую концентрацию в объеме раствора (обычно называемую поверхностной избыточной концентрацией Γ), и концентрацию ионного растворенного вещества в растворе c). Строго говоря, в уравнении Гиббса следовало

бы использовать активности, но концентрации определить гораздо легче, а они почти равны:

$$\Gamma = -\frac{c}{RT} \frac{dy}{dc} = -\frac{1}{RT} \frac{dy}{d(\ln c)}, \quad (13.31)$$

где Γ — поверхностная избыточная концентрация; c — концентрация; R — универсальная газовая постоянная; y — поверхностное натяжение; dy/dc — наклон кривой зависимости между поверхностным натяжением и концентрацией; T — абсолютная температура.

Уравнение Гиббса является основным уравнением, описывающим адсорбцию на поверхности раздела между жидкостью и газом или между жидкостью и твердым телом. Оно показывает, что поверхностная избыточная концентрация Γ прямо пропорциональна наклону кривой зависимости между поверхностным натяжением и концентрацией. Знак «минус» показывает, что Γ возрастает с увеличением крутизны отрицательного наклона. Теоретически уравнение Гиббса применимо только к системе, находящейся в состоянии равновесия и при концентрациях мицелл ниже критических.

Силы адсорбции. Лиофобность растворенного вещества и его сродство к адсорбенту являются, по-видимому, движущими силами адсорбции.

Растворимость растворенного вещества в растворителе является основным фактором, определяющим лиофобные характеристики растворенного вещества. Чем выше растворимость данного вещества в данном растворителе, тем менее вероятно его перемещение и аккумуляция на поверхности раздела. И наоборот, чем меньше растворимость вещества, тем больше вероятность его аккумуляции на поверхности раздела. В случае водных растворов водорастворимые соединения называют гидрофильными, а малорастворимые — гидрофобными. Органические соединения могут быть и гидрофильными, и гидрофобными или могут состоять из молекул, один конец которых является гидрофильным, а другой — гидрофобным. Молекулы этого последнего типа ориентируются на поверхности или на поверхности раздела так, что их гидрофобная часть находится на поверхности, а гидрофильная — в растворителе. Специфичное сродство растворенного вещества к адсорбенту является второй важной движущей силой адсорбции. Согласно современным концепциям силы притяжения, вызывающие сродство между растворенным веществом и адсорбентом, делятся на электрическое притяжение растворенного вещества к адсорбенту, Ван-дер-Ваальсовы силы и химическое взаимодействие.

Электрическое притяжение — это процесс связывания электрически заряженных частиц с другими, противоположно заряженными частицами. Это явление, называемое ионным обменом или обменной адсорбцией, более подробно рассмотрено ниже. Здесь достаточно отметить, что этот процесс заключается в адсорбции ионов из раствора на заряженных участках адсорбента. Адсорбируемые ионы замещают ионы, уже находящиеся на заряженном

участке. Таким образом, адсорбция зависит от заряда иона. Поскольку температура для всех ионов в конкретной точке одинакова, средняя кинетическая энергия одноразмерных ионов также одинакова. Таким образом, чем выше ионный заряд молекулы, тем больше ее потенциальная адсорбируемость. Трехвалентные ионы замещают двухвалентные, а двухвалентные — одновалентные. Для равнوزаряженных молекул порядок адсорбции определяется размером молекул, причем наиболее интенсивно адсорбируются самые мелкие ионы: чем меньше ион, тем он ближе подходит к участку адсорбции и прочнее удерживается.

Наиболее слабый из процессов адсорбции — в результате действия Ван-дер-Ваальсовых сил — называют физической адсорбцией. Согласно существующим теориям физическая адсорбция не связывает молекулу с определенным участком поверхности, а позволяет частице совершать поступательное движение в пределах поверхности.

Химическая или активированная адсорбция предполагает возникновение химической реакции между адсорбентом и адсорбатом (т. е. адсорбируемым веществом) на участке адсорбции. Химическая адсорбция создает прочную связь между адсорбентом и адсорбатом на химически активных участках адсорбента. Повышение температуры способствует химической адсорбции, так как при повышенных температурах химические реакции ускоряются.

На практике движущими силами адсорбции обычно выступают две или более из описанных выше сил. Разделение адсорбции на типы, по сути дела, невозможно из-за их взаимодействия, что особенно относится к химической и физической адсорбции. Разные типы адсорбции могут происходить одновременно или последовательно.

Адсорбция с помощью активного угля. Изотермы адсорбции. Адсорбцию на твердое вещество, находящееся на границе между жидкостью и твердым телом, часто характеризуют изотермами адсорбции. Изотерма адсорбции — это кривая, получаемая на графике зависимости X от C . X — это количество растворенного вещества, адсорбированного на единицу веса твердого адсорбента, а C — концентрация растворенного вещества, оставшегося в растворе после установления равновесия. Точку равновесия можно определить, поместив в раствор некоторое количество адсорбента и перемешав его. В какой-то момент адсорбция растворенного вещества прекратится, это и будет точкой равновесия.

Существует два уравнения изотермы адсорбции, выведенные теоретически, и еще одна, полученная на основании эмпирических наблюдений. В основу уравнения Лангмюра положено предположение о том, что адсорбция происходит в одном молекулярном слое над доступной поверхностью. Математически эта теория описывается следующим уравнением (Weber, 1969):

$$\frac{1}{X} = \frac{1}{X_m} + \frac{1}{bX_m} \left(\frac{1}{C} \right), \quad (13.32)$$

где X — количество растворенного вещества, адсорбированного на единицу веса твердого адсорбента; X_m — число грамм-молекул растворенного вещества, адсорбированного при образовании сплошного монослоя на поверхности адсорбента; C — концентрация растворенного вещества в растворе после установления равновесия; b — константа, характеризующая энергию адсорбции.

Графически зависимость $1/X$ от $1/C$ по уравнению (13.32) имеет вид прямого отрезка $1/X_m$ с наклоном $1/bX_m$.

Второе теоретически выведенное уравнение изотермы адсорбции — уравнение Брунауэр — Эмметт — Теллера (БЭТ) — допускает многослойную адсорбцию растворенного вещества на поверхности адсорбента:

$$\frac{C}{(C_s - C)X} = \frac{1}{AX_m} + \frac{A-1}{AX_m} \left(\frac{C}{C_s} \right), \quad (13.33)$$

где C_s — концентрация насыщения растворенного вещества в растворителе при данной температуре, A — константа, выражающая энергию взаимодействия с поверхностью; C , X , X_m — те же, что и в уравнении (13.32).

Уравнение (13.33) на графике зависимости $C/[(C_s - C)X]$ от C/C_s выражается прямым отрезком $1/AX_m$ и наклоном $(A-1)/AX_m$.

Изотерма адсорбции Фрейндлиха выводится эмпирически и описывается следующим уравнением:

$$X = KC^{1/n}, \quad (13.34)$$

где K и n — константы, а X и C — как указано выше.

Уравнение (13.34) обычно преобразуют в линейное уравнение, которое на графике с логарифмической сеткой имеет вид прямой отрезка $\log K$ с наклоном $1/n$:

$$\log X = \log K + \frac{1}{n} \log C. \quad (13.35)$$

Уравнения (13.32), (13.33) и (13.35) можно использовать для определения количества адсорбента X , необходимого для извлечения требуемого количества растворенного вещества из заданного объема отработанных вод. Уравнение Фрейндлиха (13.35) применяется также для определения количества активного угля, которое необходимо добавить при обработке воды на городских очистных установках для устранения посторонних привкуса, запаха и примесей. Его обычно применяют в виде

$$\log \left(\frac{C_i - C}{D} \right) = \log K + \left(\frac{1}{n} \right) \log C, \quad (13.36)$$

где C_i — концентрация загрязняющего вещества в воде, поступающей в очистную установку; D — количество угля, которое необходимо добавить в воду для достижения требуемой концентрации загрязняющего вещества в воде, выходящей из установки; C — концентрация загрязняющего вещества в воде, выходящей из установки; K , n — константы.

Следует отметить, что изотермы адсорбции применимы ко всем адсорбционным системам жидкость — твердое тело, а не только к системам с активным углем.

К сожалению, чтобы установить, какое из этих трех уравнений больше всего подходит для конкретного случая и для определения констант, необходимо в каждом отдельном случае проводить лабораторные эксперименты. Только построив на основании экспериментов соответствующий график, можно рассчитать необходимое количество адсорбента. Необходимо подчеркнуть, что лабораторные испытания следует проводить именно с той отработанной водой, с той концентрацией растворенного вещества и адсорбентом, которые будут использованы в очистной установке.

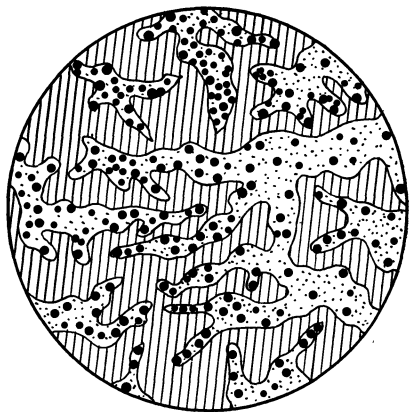


Рис. 13.42. Увеличенный поперечный разрез активного угля

Процесс адсорбции. Согласно уравнению Гиббса адсорбция прямо пропорциональна скорости уменьшения поверхностного натяжения на поверхности раздела. Уменьшение поверхностного натяжения пропорционально концентрации поверхностно-активного вещества на поверхности раздела до того момента, пока поверхностно-активное вещество полностью не покроеет всю поверхность. Таким образом, скорость перемещения поверхностно-активного вещества к поверхности раздела влияет на скорость адсорбции. Вебер (Weber, 1969) считает, что для большинства растворов поверхностное натяжение уменьшается очень быстро и указывает временной интервал от менее одной секунды до нескольких минут. Однако опыт работы с отработанными водами свидетельствует, что адсорбция идет отнюдь не так быстро.

На рис. 13.42 показан схематический разрез гранулы активного угля. Процесс активации приводит к образованию в угле тысяч мелких трещин, что значительно увеличивает площадь его поверхности. Активный уголь может иметь площадь поверхности до $2,5 \cdot 10^6 \text{ м}^2/\text{кг}$, но чаще встречается уголь с площадью поверхности $1 \cdot 10^6 \text{ м}^2/\text{кг}$ (Environmental Protection Agency, 1973 а).

Адсорбция на активном угле — это процесс, протекающий в два или три этапа в зависимости от участка, где происходит адсорбция. На первом этапе, называемом пленочной диффузией, происходит перенос растворенного вещества сквозь пленку на поверхности активного угля. Второй этап — поровая диффузия — характеризуется диффузией адсорбата в порах или трещинах адсорбента. Адсорбат, который адсорбируется на внешней стороне активного угля, эту стадию минует. Третий этап — фактическая адсорбция адсорбата на поверхности активного угля. При некоторых условиях скорость адсорбции лимитируется диффузией сквозь поверхностную пленку. При значительной турбулентности

скорость адсорбции лимитируется поровой диффузией. Вебер и Моррис (Weber and Morris, 1963) указывают на ограничение скорости адсорбции процессом поровой диффузии. Все изложенное объясняет почему адсорбция идет не так быстро, как это можно было бы предположить, исходя из скорости уменьшения поверхностного натяжения.

Параметры процесса при адсорбции углем. Эффективность адсорбции зависит от многих переменных. К сожалению, современный уровень знаний не позволяет получить общее количественное решение или заранее оценить влияние этих переменных. Тем не менее можно сделать определенные выводы и установить некоторые соотношения.

Площадь поверхности. Поскольку адсорбция является поверхностным явлением, она зависит от площади поверхности. Площадь поверхности зависит в свою очередь от исходного материала, из которого изготовлен активный уголь, способа его приготовления и размера частиц. Активный уголь получают из разных материалов, в том числе костей, угля, дерева, некоторых видов ореховой скорлупы (особенно скорлупы кокосового ореха и ореха-пекана), опилок, промышленных и сельскохозяйственных отходов. С уменьшением размера частиц угля площадь поверхности активного угля увеличивается. Поскольку площадь поверхности является важным фактором, целесообразно, чтобы она была как можно больше. Однако, как и в случае с песчаными фильтрами, мелкие частицы в неподвижных слоях быстро приводят к закупорке пор твердыми веществами, а также потере напора.

Концентрация растворенного вещества. Скорость адсорбции углем зависит от движущей силы, которая определяется градиентом концентрации между раствором и адсорбентом. Именно поэтому скорость адсорбции высока у нового или регенерированного активного угля и снижается по мере увеличения поверхностной избыточной концентрации. Высокая концентрация растворенного вещества также увеличивает скорость адсорбции. Скорость адсорбции и разность между концентрациями в растворе и на поверхности адсорбента связаны логарифмической зависимостью.

Вес растворенного вещества, адсорбированного единицей веса адсорбента, т. е. его адсорбционная способность, возрастает с увеличением концентрации растворенного вещества. Брюноттс и др. (Brunotts et al., 1973) показали, что логарифм веса растворенного вещества, адсорбированного на единицу веса угля, связан линейной зависимостью с логарифмом общего содержания органического углерода в промышленных стоках. Хотя это, по-видимому, верно и не во всех случаях, между концентрацией растворенного вещества и адсорбционной способностью часто существует логарифмическая зависимость. Интересно отметить, что адсорбционная способность угля часто реализуется не полностью, особенно в проточных системах. Адсорбционная способность до момента проскака часто зависит от скорости потока, pH и других переменных (Weber and Morris, 1965).

Свойства адсорбата. Свойства адсорбата влияют как на скорость, так и на количество адсорбируемого адсорбентом вещества. Правило Лунделиуса определяет влияние свойств адсорбата на эффективность адсорбции: адсорбция из раствора увеличивается с уменьшением растворимости адсорбата в растворе.

Правило Траубе: адсорбция органических веществ из водного раствора закономерно увеличивается по мере возрастания гомологического ряда (т. е. по мере утяжеления молекул в ряду). Поскольку молекулы с более длинной цепью проявляют тенденцию к меньшей растворимости в воде с увеличением длины цепи, правило Траубе тесно связано с правилом Лунделиуса.

Для ряда сульфированных алкилбензолов с разным размером молекул Вебер (Weber, 1969) показал, что скорость адсорбции уменьшается линейно. Хотя скорость адсорбции связана с размером молекул не всегда линейной зависимостью, размер и конфигурация молекул оказывают значительное влияние на скорость адсорбции и адсорбционную способность. Это и понятно, так как поровая диффузия часто является этапом, контролирующим скорость процесса адсорбции, а мелкие молекулы быстрее проникают в поры угля, чем крупные. И действительно, очень большие молекулы просто физически не могут пройти в мелкие поры. В таком случае адсорбционная способность уменьшается из-за сокращения площади, доступной для адсорбции.

Ионные свойства молекулы тоже могут иметь значение при адсорбции на угле. Вебер (1969) указывает, что вообще для структурно простых адсорбирующих молекул адсорбция максимальна для электрически нейтральных видов и минимальна для заряженных видов. В системах для культивирования водных организмов, содержащих значительное количество белковых веществ, адсорбция углем должна быть максимальной в изоэлектрической точке белков и пониженной в других точках. Однако ионизация имеет гораздо меньшее значение в более сложных соединениях (Weber, 1969). К сожалению, для большинства белков изоэлектрическая точка лежит ниже pH 5. Такая концентрация водородных ионов неприемлема в системах культивирования водных организмов. pH раствора часто влияет на адсорбцию других ионов, поскольку ионы водорода и гидроокиси адсорбируются очень активно, кроме того, pH влияет на ионизацию кислых и основных растворов. Степень ионизации таких растворов иногда влияет на адсорбцию.

В общем случае органические примеси в воде лучше адсорбируются при снижении pH. Вебер и Моррис (1963) показали, что сульфированные алкилбензолы быстрее адсорбируются активным углем при уменьшении pH. Они предложили, что, поскольку сульфонаты алкилбензола заряжены отрицательно, нейтрализация отрицательных зарядов на поверхности угля уменьшает сопротивление диффузии и увеличивает адсорбцию.

Температура. Температура оказывает как прямое, так и косвенное влияние на процесс адсорбции. Косвенное влияние заклю-

чается в том, что температура влияет на вязкость и плотность воды. Поскольку температура является показателем кинетической энергии молекулы, она непосредственно влияет на изотермы адсорбции, а так как адсорбция — процесс экзотермический, снижение температуры способствует ее ускорению. Несмотря на это, температура в системах для культивирования водных организмов оказывает относительно незначительное воздействие на адсорбцию активным углем.

Многокомпонентные растворы. В воде систем для культивирования организмов содержатся различные растворенные вещества. Современный уровень знаний не позволяет установить, вступают ли содержащиеся в воде растворенные вещества в конкуренцию за участки адсорбции и каково их взаимовлияние при адсорбции. Несомненно, относительный размер молекул, адсорбционное сродство и относительные концентрации различных растворенных веществ оказывают влияние на адсорбцию всех растворенных веществ. Опыты Вебера и Морриса с детергентами (Weber and Morris, 1964) показали, что присутствие более чем одного растворенного вещества снижает адсорбцию каждого из них, но увеличивает общую адсорбционную способность активного угля по сравнению с его адсорбционной способностью в отношении каждого отдельного растворенного вещества. К сожалению, такие данные для отработанных вод систем аквакультуры, по-видимому, отсутствуют.

Свойства адсорбента. Выше упоминался только активный уголь, но существует еще много других типов адсорбентов (летучая зола, глинозем и т. д.). Та небольшая информация, которая имеется по этим соединениям, относится к их использованию в системах очистки городских сточных вод, и применить эти данные непосредственно для культивирования водных организмов нельзя. Все другие адсорбенты, пожалуй, менее эффективны, чем активный уголь, по-видимому, из-за меньшей площади поверхности на единицу веса.

Типы угольных фильтров. Угольные фильтры могут быть периодического и непрерывного действия. Фильтр периодического действия представляет собой резервуар, заполненный активным углем. Бассейн заполняют отработанной водой. Часто для увеличения скорости адсорбции воду и уголь перемешивают и смеси дают отстояться. Затем очищенную воду отводят, а уголь либо выбрасывают, либо регенерируют. Такая система дает хорошие результаты при небольших объемах воды, но является трудоемкой и имеет ограниченную пропускную способность.

Контактные фильтры непрерывного действия можно разделить, по меньшей мере, на два типа. Первый, как и фильтр периодического действия, представляет собой бассейн с гранулированным углем, но отработанная вода непрерывно поступает с одного конца бассейна, проходит через уголь и вытекает из противоположного конца. Контактное время, таким образом, зависит от скорости потока и объема угольного слоя. Если вода в бассейн пода-

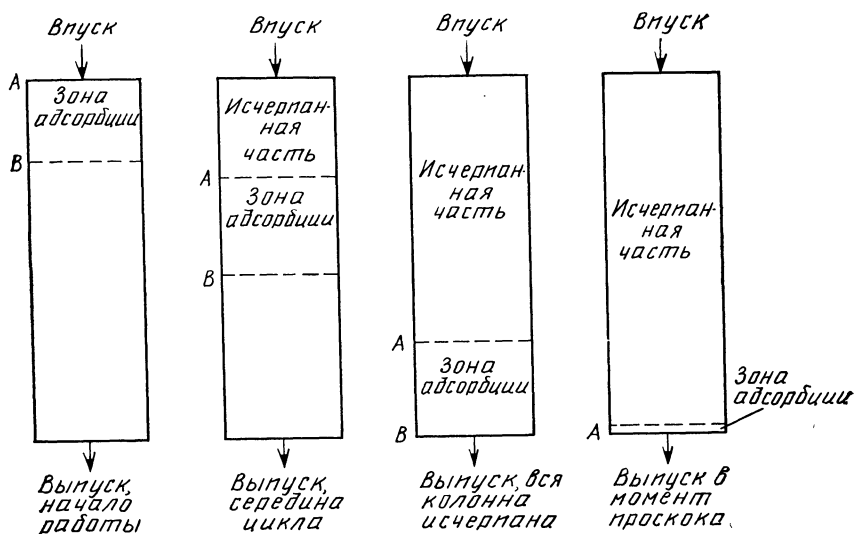


Рис. 13.43. Зоны адсорбции в нисходящем угольном фильтре

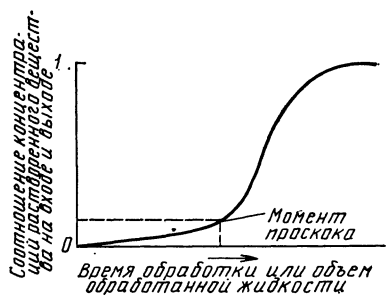


Рис. 13.44. Кривая проскока через угольный фильтр

ется снизу вверх, это восходящий фильтр. В восходящих фильтрах применяют либо гранулированный, либо порошкообразный уголь. Поскольку при неподвижном слое порошкообразного угля потеря напора будет слишком большой, обычно применяют ожиженный слой. Ожижение позволяет использовать мелкозернистый уголь, обеспечивает большую площадь поверхности на единицу веса и улучшает адсорбцию. Кроме того, турбулентность в фильтре увеличивается, что также повышает скорость адсорбции.

В контактных фильтрах непрерывного действия второго типа порошкообразный уголь подают в поток отработанной воды. По истечении определенного контактного времени уголь с адсорбированными веществами отделяют от воды. При этом отпадает необходимость в больших контактных резервуарах, и такие фильтры часто используют в системе очистки городских сточных вод.

Кривые проскока через адсорбент. Адсорбция в колонне показана на рис. 13.43. Сначала адсорбция идет в зоне А—В. По мере насыщения верхней части зоны растворенным

веществом зона постепенно смещается вниз, пока нижняя ее граница (B) не достигнет дна колонны. Если после этого цикл продолжается, то верхняя граница зоны адсорбции приблизится к дну колонны, и глубина зоны существенно уменьшится. Сокращение зоны адсорбции приводит к уменьшению эффективности адсорбции и увеличению концентрации растворенного вещества в выходящей воде.

Угольные фильтры непрерывного действия рассчитываются на основании кривых проскока (рис. 13.44). В начале работы фильтра отношение концентрации растворенного вещества в выходящей воде к его концентрации в поступающей воде C_e/C_i будет небольшим. В процессе работы фильтра концентрация медленно линейно возрастает. В определенный момент времени отношение C_e/C_i становится нелинейным и резко увеличивается. Это происходит, когда нижняя граница зоны адсорбции в нисходящем фильтре (см. рис. 13.43) достигает дна колонны. Сокращение зоны адсорбции со временем приводит к увеличению отношения C_e/C_i до тех пор, пока концентрация в выходящей воде станет равной концентрации во входящей воде, а весь уголь окажется насыщенным растворенным веществом. Точка проскока, показанная на рис. 13.44, — это тот момент, когда вода на выходе перестает отвечать предъявляемым к ее качеству требованиям. Поскольку требования к качеству воды зависят от ее назначения, положение точки непостоянно. Точка проскока обозначает момент, когда адсорбент следует заменить. Когда концентрация растворенного вещества в воде, выходящей из колонны, начинает превышать допустимую, считается, что произошел проскок через адсорбент.

Расчет угольного фильтра. Кривую проскока строят экспериментально с помощью лабораторной колонны и пробы подлежащей обработке сточной воды. Хотя это и вполне надежный метод, но в некоторых случаях лабораторные данные нельзя целиком распространить на промышленные угольные колонны. Адсорбция зависит от типа активного угля и размеров его частиц, от характеристик отработанной воды, вида контактирования воды и угля и скорости протекания воды. Поскольку адсорбция протекает в зоне, необходима соответствующая минимальная глубина фильтра. Как правило, при выборе угольного фильтра для конкретного применения проводят испытания на проскок с несколькими наиболее подходящими типами угольных фильтров. По изотермам адсорбции, полученным от изготовителя, а еще лучше построенным экспериментально, и по кривой проскока можно рассчитать вес растворенного вещества, адсорбируемого на единицу веса угля. С увеличением скорости протекания жидкости эта величина может уменьшаться, поэтому кривые проскока целесообразно вычерчивать для различных скоростей. Определив адсорбционную способность при расчетных эксплуатационных условиях и тип угля, можно по кривым проскока вычислить время контакта с углем, размер резервуара и интервалы времени между заменами угля.

Вебер (1969) приводит подробную методику расчета фильтров с неподвижным слоем угля, хотя они и не предназначены специально для систем аквакультуры. Однако его методика в значительной степени опирается на графическое интегрирование кривой. Рассмотрение подхода Вебера выходит за рамки данной книги и более подробную информацию читатель может получить непосредственно из его работы.

Хатчинс (Hutchins, 1973) разработал методику расчета систем с активным углем, в основу которой положен срок службы фильтрующего слоя. Этот метод основан на том, что зависимость срока службы (время от начала работы фильтра) от толщины слоя (глубина контактора) носит линейный характер.

$$t = a + bx, \quad (13.37)$$

где t — срок службы, ч; a — отрезок на оси t при $x=0$; b — наклон прямой линии; x — толщина слоя, м.

Отрезок a определяется из выражения

$$a = \frac{1}{K C_i} \ln \left(\frac{C_i}{C_0} - 1 \right), \quad (13.38)$$

где K — постоянная скорости адсорбции (количество обработанной жидкости в м^3 на 1 кг загрязняющего вещества, поступающего в систему за 1 ч), необходимой для перемещения фронта адсорбционной волны через слой, толщина которого равна зоне активной адсорбции (зона $A-B$ на рис. 13.43); C_i — концентрация растворенного вещества в поступающей жидкости, мг/л, C_0 — концентрация растворенного вещества в вытекающей жидкости в момент проскока, мг/л.

Наклон b в уравнении (13.37) определяется из уравнения

$$b = 395 N_0 / C_i Q, \quad (13.39)$$

где N_0 — эффективность угля, кг растворенного вещества на 1 м^3 угля; Q — скорость потока, $\text{м}^3/(\text{мин} \cdot \text{м}^2)$; C_i — концентрация растворенного вещества в поступающей жидкости, мг/л.

Таким образом, подставив уравнения (13.38) и (13.39) в уравнение (13.37), получаем

$$t = \frac{1}{K C_i} \ln \left(\frac{C_i}{C_0} - 1 \right) + 395 \left(\frac{N_0}{C_i Q} \right) x. \quad (13.40)$$

Это уравнение и определяет срок службы слоя активного угля. Наклон b [уравнение (13.39)] — это срок службы (в ч) 1 м угля в лабораторных условиях. Величина, обратная наклону, — это скорость насыщения угля растворенным веществом. Таким образом, величина, обратная наклону, умноженная на кажущийся объемный вес адсорбента, дает ориентировочный срок службы адсорбента.

Отрезок абсциссы — это критическая толщина слоя, т. е. минимальная толщина, необходимая для обеспечения требуемого ка-

чества воды в начале работы. Отрезок ординаты [уравнение (13.38)] — это скорость адсорбции, или время, необходимое для прохождения фронта волны адсорбции через слой критической толщины.

Угол наклона и длину отрезка в уравнении (13.40) можно получить с помощью опытной установки, обычно состоящей из трех угольных колонн. Глубина каждой колонны должна соответствовать глубине полногабаритной колонны. Скорость протекания на единицу площади поперечного сечения и качество воды на входе также должны быть идентичны тем, которые ожидаются в промышленной установке. По мере протекания отработанной воды через колонны пробы воды на входе в первую колонну и на выходе всех трех колонн отбирают и анализируют через равные промежутки времени. Строят график зависимости содержания растворенного в воде вещества от срока службы каждой колонны. Момент проскока можно определять для любого требуемого качества воды на выходе. Поскольку опытная установка состоит, по меньшей мере, из трех колонн, получится три точки. Затем для каждой колонны рассчитывают время до проскока и получают три значения продолжительности работы, соответствующие трем значениям эффективной толщине слоя. На графике зависимости продолжительности работы до проскока от толщины слоя вычерчивают кривую, которая должна быть прямолинейной, если скорость протекания жидкости, содержание и состав примесей оставались относительно постоянными во время опыта.

Найденную экспериментально кривую можно использовать для определения постоянных из уравнения (13.40). Изменение скорости протекания жидкости вызовет только изменение наклона кривой. Чтобы учесть изменение скорости в уравнении (13.40), наклон, т. е. уравнение (13.39), умножают на отношение новой скорости протекания жидкости к старой (Hutchins, 1973).

Влияние неодинаковой концентрации растворенного вещества в поступающей воде можно оценить также математически, хотя более надежные результаты дает проведение специальной серии испытаний. Изменение концентрации растворенного вещества в поступающей воде вызывает изменение наклона и длины отрезка в уравнении (13.40). Новый наклон можно оценить, умножив первоначальный наклон на отношение начальной концентрации к новой.

Несколько сложнее определить длину отрезка. Для этого можно взять уравнение (13.38) и выполнить следующие вычисления:

$$a' = a \frac{C_0}{C_n} \left\{ \frac{\ln [(C_n/C_{n1}) - 1]}{\ln [(C_0/C_{01}) - 1]} \right\}, \quad (13.41)$$

где a — длина первоначального отрезка; a' — длина нового отрезка; C_n — новая концентрация растворенного вещества на входе, мг/л; C_0 — первоначальная концентрация растворенного вещества на входе, мг/л; C_{n1} — новая концентрация растворенного вещества на выходе, мг/л; C_{01} — первоначальная концентрация растворенного вещества на выходе, мг/л.

Удаление вирусов. Показана возможность удаления некоторых вирусов адсорбцией на активном угле (Cookson, 1967; Cookson, 1970; Sproul et al., 1967). Куксон (1970) утверждает, что адсорбция вируса в колонне активного угля достаточно точно описывается теорией переноса масс. Выводы Куксона (1967, 1970) были основаны на удалении бактериофага T_4 вируса *Escherichia coli*. Исследования Куксона и Норта (Cookson and North, 1967) показали, что активный уголь малоэффективен для адсорбции вируса. По их оценке, максимальная зона действия поверхности адсорбента составляла всего 18 %, и из-за размера бактериофага T_4 *E. coli* адсорбция в порах, по-видимому, не происходила. Эти результаты дают основание предполагать, что адсорбция на активном угле происходит в единичном слое и все участки угля обладают одинаковой адсорбционной способностью.

Адсорбция вируса зависит от его концентрации в растворе. Куксон и Норт (1967) показали, что адсорбция резко увеличивалась, когда концентрация бактериофага T_4 *E. coli* возрастала до $3 \cdot 10^7$ экз./мл, но оставалась постоянной при увеличении концентрации.

Следует отметить, что эта величина, вероятно, будет меняться в зависимости от типа угля, вида вируса, размера частиц угля и других переменных. Куксон и Норт (1967) указывают, что адсорбцию вируса на активном угле можно представить изотермой Лангмюра.

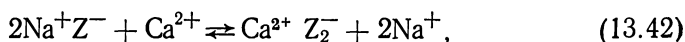
Органическое вещество конкурирует с полиовирусом за участки адсорбции (Sproul et al., 1969). Если воду, содержащую органические примеси, пропустить через насыщенный вирусом фильтр, то органическое вещество вытеснит вирус, что приведет к высокой концентрации вируса в отфильтрованной воде. Обобщая информацию по адсорбции вирусов активным углем, Спроул и др. (1969) утверждают, что адсорбция действительно происходит (в лучшем случае можно рассчитывать на удаление 40 %), но процесс не настолько надежен, чтобы на него можно было полагаться в отношении удаления вирусов при обработке отработанных вод.

Ионообмен. Электрохимический обмен ионами между двумя веществами (обычно между раствором и нерастворимым в растворе твердым веществом) называется ионообменом. Ионообмен — это явление не только поверхностной адсорбции, он затрагивает также и внутреннюю структуру трехмерных молекул. Таким образом, это процесс одновременно и адсорбционный, и абсорбционный, и его лучше всего назвать сорбцией.

Ионообменные смолы можно разделить на четыре группы: сильнокислые катионы, слабокислые катионы, сильноосновные анионы и слабоосновные анионы. Эта классификация основана на способе изготовления, а также на свойствах материала. Кроме того, существует множество естественных ионообменных материалов, таких, как глины и цеолиты. Выбор соответствующей смолы для сорбции конкретного соединения зависит от свойств соедине-

ния. Обычно необходимые сведения можно получить у изготовителя смол.

В качестве примера ионообменного процесса рассмотрим умягчение воды. Жесткость воды обусловлена присутствием в ней кальция и магния. Эти элементы можно удалить с помощью натриевого цеолита:



где Z — цеолит, или твердая фаза в ионообменной системе.

При прохождении жесткой воды через цеолит ионы натрия высвобождаются и замещаются ионами кальция. Вода на входе содержит главным образом ионы Ca^{2+} или Mg^{2+} , а на выходе — ионы Na^+ , которые не придают воде жесткости. На каждый удаляемый цеолитом ион кальция высвобождается два иона натрия. Этот обмен двух ионов на один является результатом необходимости сохранить электрическую нейтральность цеолита и раствора. Кальций двухвалентен, натрий одновалентен.

Уравнение (13.42) представляет обменную реакцию только для одного типа ионообмена. Другие ионообменные процессы осуществляются путем аналогичных реакций, хотя в них участвуют другие ионы. Катионообменные процессы идут в основном с участием металлов, а анионообменные удаляют такие анионы, как сульфиды, фториды и бикарбонаты.

Ионообмен происходит в определенной последовательности. Для синтетических смол Фэйер и др. (Fair et al., 1968) приводят следующие ряды ионов в порядке увеличения сродства:

1. $\text{Li} < \text{H}^+ < \text{Na}^+ < \text{K}^+ = \text{NH}_4^+ < \text{Rb}^+ < \text{Ag}^+$;
2. $\text{Mg}^{2+} = \text{Zn}^{2+} < \text{Cu}^{2+} < \text{Ca}^{2+} < \text{Sr}^{2+} < \text{Ba}^{2+}$;
3. $\text{F}^- < \text{HCO}_3^- < \text{Cl}^- < \text{Br}^- < \text{NO}_3^- < \text{I}^- < \text{ClO}_4^-$.

Двухвалентные ионы имеют более высокое сродство к ионообменным смолам, чем одновалентные.

Существуют также смолы, называемые селективными ионообменными смолами и созданные специально для сорбции определенных ионов, например NH_4^+ . Для этих смол характерна весьма высокая избирательность по отношению к тем ионам, для удаления которых из раствора они предназначены.

Ионообмен можно использовать для удаления из сточных вод ионов аммония. В водных растворах аммиак (NH_3) находится в равновесии с аммонием (NH_4^+), причем относительное содержание каждой формы зависит от pH системы. Неионизированная форма (NH_3) высокотоксична для культивируемых водных организмов. Удаление NH_4^+ снижает также и содержание NH_3 из-за реакции равновесия.

Для удаления аммиака из городских стоков используют клинфидолит — природный цеолит (Culp, 1974) и сильнокислые катионообменные смолы натриевой формы (Spotte, 1974). Удаление

93—97 % аммиака клиноптилолитом на опытной очистной установке производительностью 378 м³ в день было продемонстрировано Мерсером и др. (Mercer et al., 1970). Джонсон и Сиберт (Johnson and Sieburth, 1974) показали, что при содержании в воде растворенного органического и другого вещества, равном 30 мг/л, момент проскока сдвинулся с 35 до 10 л поступавшего на обработку в клиноптилолитовую колонну стока. Кроме того, органическое вещество, по-видимому, препятствует регенерации клиноптилолита. После регенерации эффективность колонны, через которую ранее проходило органическое вещество, была вдвое ниже эффективности колонны, через которую до регенерации проходила только дистиллированная вода и аммиак (Johnson and Sieburth, 1974).

Органическое вещество, содержащееся в поступающей воде, блокирует ионообменный слой, что увеличивает потерю напора (Kunin, 1950). Кроме того, она закрывает ионообменный субстрат, препятствует обмену ионов жидкой и твердой фаз. Это уменьшение обменной способности сокращает интервалы времени между циклами регенерации и увеличивает продолжительность цикла регенерации и периода промывки (Arden, 1968).

Очистку смол можно осуществить отмачиванием в течение 12—24 ч в смеси рассола и гипохлорита, содержащей около 2 % активного хлора (Arden, 1968). В результате темное органическое вещество осветляется и количество его уменьшается, но, по всей видимости, полная очистка не происходит. Кроме того, гипохлорит разрушает некоторые смолы и может привести к значительному снижению обменной способности смолы, если такая обработка производится периодически в течение более 2—3 лет (Arden, 1968).

Арден (1968) рекомендует пропускать через ионообменный слой тонкими струями в течение 1—2 ч раствор 10 %-ной NaCl и 1 %-ного NaOH в объеме, равном полутора объемам слоя. Желательно предварительное отмачивание слоя в течение ночи. Такая обработка удаляет большую часть органических веществ и восстанавливает ионообменную способность почти до первоначального состояния.

Джонсон и Сиберт (1974) проводили также опыты по ионообмену в искусственной морской воде соленостью 5, 10, 15 и 25 ‰, как содержавшей, так и не содержавшей растворенное органическое вещество. Эффективность удаления аммиака смолой AW-500 в воде соленостью 5 ‰ снижалась в 10 раз. Более высокая соленость вызывала дальнейшее уменьшение эффективности, но не столь значительное. Аналогичные результаты наблюдались и в случае применения клиноптилолита. Высокие концентрации различных ионов в морской воде приводят к быстрому насыщению ионообменных смол. Спотт (Spotte, 1970) и Джонсон и Сиберт (1974) пришли к выводу, что ионообмен не годится для удаления аммиака из морских систем. Такого же мнения придерживается и автор (Wheaton, 1975). Спотт (1970) указывает, что ионо-

обмен пригоден для удаления нитратов и фосфатов из пресноводных систем, но не морских из-за высокого содержания в них ионов. К ионообменным смолам предъявляются следующие требования: большая площадь для ионообмена; регенерация недорогими материалами (например, NaCl); нерастворимость в экстрагируемом растворе и поглощение достаточного количества воды для обеспечения свободного проникания молекул растворенного вещества в частицы цеолита.

Существующие материалы в разной степени удовлетворяют этим требованиям. Почти все синтетические ионообменные цеолиты — это полистиролы с поперечными связями, к которым присоединены различные молекулярные структуры для придания материалу соответствующих свойств. Существуют также природные материалы, обладающие ионообменными свойствами; к их числу относятся глины, глауконитовый песок и клинфтилолит.

Ионообмен находит применение при очистке пресных вод, использованных для выращивания гидробионтов. Изучалось удаление с помощью ионообмена аммония, нитрата и фосфата (Nesbitt, 1969). По-видимому, это реально, особенно для аммония. Удаление ионообменом некоторых органических кислот также, по-видимому, целесообразно. Из-за присутствия самых разнообразных ионов и их высокой концентрации в соленой воде обменные участки твердой фазы заполняются настолько быстро, что ионообмен, по-видимому, нецелесообразно применять в солоноводных и солоноватоводных (3—5 мг/л и выше) системах для культивирования организмов. Относительно большое количество органического вещества, обычно присутствующее в отработанных водах таких систем, необходимо значительно уменьшить (а иногда и полностью удалить) до ионообменной обработки. В противном случае ионообменная способность слоя снизится и потребуются частая очистка для удаления органического материала с ионообменного слоя.

При попытках восстановить отработанные культуральные воды следует учитывать характер обменного процесса. Некоторые ионы экстрагируются, другие высвобождаются. Поскольку высвобожденные ионы могут оказаться токсичными для культивируемых организмов, следует с большой осторожностью подходить к выбору ионообменной смолы и режиму работы ионообменника.

Момент проскока через ионообменный слой зависит от характеристик отработанной воды (например, содержание твердого и органического вещества), скорости потока, типа смолы, объема обменного слоя и обменной способности. Для определения моментов проскока лучше всего провести эксперименты с учетом всех факторов. Обрастание водорослями и микробами также может уменьшить скорость обмена и обменную способность.

Пенное фракционирование. Процесс сепарации или концентрации растворенных веществ адсорбцией одного или нескольких растворенных веществ на поверхности пузырьков называется пенным фракционированием. В процессе адсорбции растворенное

вещество концентрируется на поверхности жидкости, удаляется и сконцентрированное растворенное вещество. На рис. 13.45 показано принципиальное устройство пеноотделительной колонки. Питающий раствор, содержащий растворенное вещество и растворитель, закачивают в цилиндрическую колонну. В нижнюю часть колонны через диффузор подают газ (обычно воздух), который образует мелкие пузырьки. Пузырьки поднимаются к поверхности жидкости и при этом собирают на своей поверхности растворенное вещество. На поверхности жидкости образуется пена, содержащая растворенное вещество и небольшое количество растворителя. По мере накопления пена попадает в камеру — коллектор и затем отводится. «Чистый» растворитель, т. е. донный остаток с пониженным содержанием растворенного вещества, выводится из нижней части колонны. Уровень жидкости в колонне регулируется с помощью клапана в нижней части колонны; можно также подсоединить к выводному отверстию шланг или трубу и поднимать ее конец до тех пор, пока уровень жидкости не достигнет требуемой отметки.

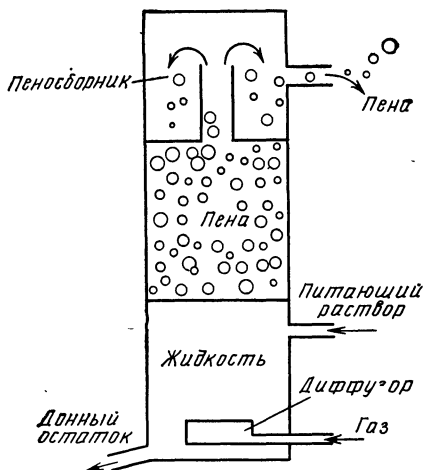


Рис. 13.45. Схема установки для пенного фракционирования

Существует несколько способов разделения, сходных с пенным фракционированием, некоторые из которых могут найти применение в хозяйствах аквакультуры. Не останавливаясь на них подробно, отметим лишь их особенности. Пузырьковое фракционирование аналогично пенному, за исключением того, что при этом способе пена не образуется. Этот процесс идет в присутствии поверхностно-активного вещества, но по разным причинам пена не образуется. Поскольку раствор вблизи поверхности жидкости обогащается растворенным веществом, медленное удаление поверхностной жидкости снижает содержание растворенного вещества в донном остатке.

Флотация, используемая при удалении отходов, очистке руды и концентрировании микроорганизмов, весьма сходна с пенным фракционированием. Процесс заключается в барботировании воздуха в смесь жидкости и твердого вещества и присоединении пузырьков к твердому веществу до тех пор, пока удельный вес системы твердое вещество — пузырек не станет меньше удельного веса воды и она не всплывет на поверхность.

Пенное фракционирование используется для разделения или очистки различных материалов. Рубин и Гейден (Rubin and Gaden,

1962) приводят список 92 элементов и соединений, которые очищают, концентрируют или разделяют с помощью пенного фракционирования. Важно отметить, что в этот список вошли некоторые ионы, встречающиеся в морской воде (например, кальций, медь, магний, марганец). Некоторые исследователи использовали пенное фракционирование для удаления растворенного органического вещества из воды, в которой содержалась рыба или беспозвоночные (Dwivedy, 1973; Spotte, 1970; Wheaton, 1973; Lomax and Wheaton, 1975). Удаление органических веществ из такой воды уменьшает образование аммиака путем извлечения исходных белковых веществ до их разложения под влиянием бактерий (Dwivedy, 1973). Таким образом, пенное фракционирование уменьшает БПК, ХПК* и накопление нитратов в воде, в которой содержались культивируемые организмы (Dwivedy, 1973; Lomax, 1976). Поскольку с помощью пенного фракционирования удаляют растворенные органические вещества, в том числе и органические кислоты, оно позволяет контролировать pH среды (Dwivedy, 1973).

Пенное фракционирование пригодно для удаления поверхностно-активных растворенных веществ или растворенных веществ, которые можно сделать поверхностно-активными добавлением соответствующего вещества, вызывающего образование внутрикомплексных соединений. Поскольку пенное фракционирование более эффективно при низких концентрациях растворенного вещества, его используют главным образом для концентрирования и выделения растворенных веществ из разбавленных растворов. Его применяют также для концентрирования или разделения ферментов, белков и других биологических веществ, чувствительных к температуре, изменениям pH, растворителям и другим факторам. Однако некоторые белки на границе раздела жидкость — газ, по видимому, денатурируют (Schnepf and Gaden, 1959).

Теоретические основы. Адсорбция на границе раздела фаз описывается уравнением Гиббса в общем виде

$$\Gamma = - \frac{a}{RT} \frac{d\gamma}{da}, \quad (13.43)$$

где Γ — поверхностная избыточная концентрация, г·моль/см²; a — активность растворенного вещества, г·моль/см³; R — универсальная газовая постоянная, 8,48·10⁶ г/(с²·моль·К); T — абсолютная температура, К; γ — поверхностное натяжение, г/с².

В литературе это уравнение встречается в разных видах в зависимости от допущений и конкретных условий. Обзор этих уравнений дан в работе Рубина и Гейдена (1962). Однако пенное фракционирование обычно применяют для сильно разбавленных растворов, а при этих условиях активность можно аппроксимиро-

* БПК — биохимическое потребление кислорода; ХПК — химическое потребление кислорода, которое определяется по количеству израсходованного раствора КМnO₄ и называется перманганатной окисляемостью.

вать концентрацией — параметром, который легко определить, поэтому уравнение (13.43) обычно записывают в виде

$$\Gamma = -\frac{C}{RT} \frac{d\gamma}{dC}, \quad (13.44)$$

где C — концентрация, г·моль/см³.

Еще более удобный вид уравнение (13.44) принимает, если его записать в виде уравнения (13.45), которое применимо для неионного поверхностно-активного вещества в водном растворе при концентрациях ниже критической мицеллярной. Критическая мицеллярная концентрация — это концентрация, выше которой поверхностно-активное вещество находится не в виде определенных молекул, а в агрегированном состоянии:

$$\Gamma = -\frac{1}{RT} \frac{d\gamma}{d(\ln C)}. \quad (13.45)$$

Таким образом, если построить график, на одну ось которого нанести поверхностное натяжение γ , а на другую натуральный логарифм концентрации C , то наклон линии будет равен $1/RT\Gamma$. Поскольку R и T известны, можно определить Γ . Если поверхностно-активное вещество находится в водном растворе при низких концентрациях, адсорбцию можно рассматривать как монослой поверхностно-активного вещества на поверхности пузырьков. Если это так, то Γ можно аппроксимировать выражением $3 \cdot 10^{-10}$ г·моль/см². Лаш (Lush, 1976), работавший с расширяющимися водными растворами детергента Тритон X-100, обнаружил, что $\Gamma = 2,3 \cdot 10^{-10}$ г·моль/см², что близко к величине 3×10^{-10} г·моль/см².

Критическую мицеллярную концентрацию (КМК) можно также определить как концентрацию, при которой наклон графика, характеризующего зависимость поверхностного натяжения от логарифма концентрации, резко возрастает (обычно отрицательно). В физическом смысле это момент, когда межфазовая площадь (т. е. площадь поверхности раздела между двумя фазами) оказывается насыщенной и добавление растворенного вещества приводит к агрегированию его молекул (т. е. образованию мицелл) в объемном растворе. Поскольку поверхность между фазами уже насыщена, добавление растворенного вещества сверх КМК не оказывает существенного влияния на поверхностное натяжение.

Рабочий режим. Установки для пенного фракционирования разнообразны по форме, но работают по одному из четырех основных рабочих режимов. Первый из них (см. рис. 13.45) называют простым режимом: питающий раствор поступает ниже уровня жидкости, пену удаляют сверху, а «чистую» жидкость — снизу.

Идеальная работа установки для пенного фракционирования описывается следующими уравнениями (Lemlich, 1968):

$$C_0 = C_b + \frac{GS\Gamma_b}{Q_0}, \quad (13.46)$$

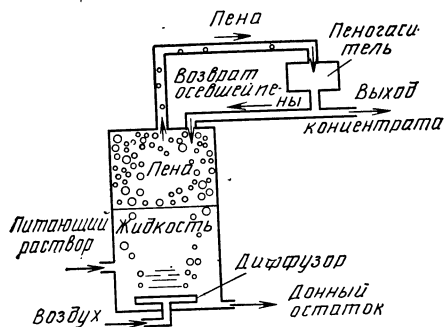


Рис. 13.46. Установка для пенного фракционирования в режиме обогащения

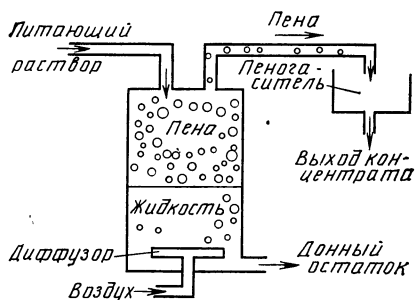


Рис. 13.47. Установка для пенного фракционирования в режиме отгонки

где C_0 — концентрация растворенного вещества в пене, г·моль/см³; C_b — концентрация растворенного вещества в донном остатке, г·моль/см³; G — скорость потока газа, см³/с; G_b — поверхностная избыточная концентрация растворенного вещества на пузырьках в условиях равновесия с концентрацией в донном остатке, г·моль/см²; Q_0 — скорость потока безгазовой пены, см³/с; S — отношение поверхности пузырька к его объему, см⁻¹.

$$C_b = C_f - \frac{GS\Gamma_b}{Q_f}, \quad (13.47)$$

где C_f — концентрация растворенного вещества в питающем растворе, г·моль/см³; Q_f — объемная скорость потока питающего раствора, см³/с.

Уравнения (13.46) и (13.47) будут приблизительно описывать работу установки для пенного фракционирования, если отверстие для впуска воздуха достаточно заглублено (в большинстве случаев достаточным считается 30—60 см), а слипание пузырьков в колонне пренебрежимо мало (Lemlich, 1968). Слипание пузырьков и другие отклонения от идеальных условий снижают эффективность работы.

Второй режим работы установки пенного фракционирования (рис. 13.46) часто называют режимом обогащения, так как часть осевшей пены вновь поступает в колонну и проходит сквозь образующуюся пену. Благодаря этому концентрация растворенного вещества в пене увеличивается, так как осевшая и более концентрированная пена замещает жидкость, окружающую пузырьки. Идеальная работа установки для пенного фракционирования в режиме обогащения описывается следующим уравнением:

$$C_{0l} = C_b + \frac{GS\Gamma_b}{Q_{0l}}, \quad (13.48)$$

где C_{0l} — объемный поток пены (в виде жидкости), возвращаемый в колонну, см³/с.

$$C_b = C_f - \frac{GS\Gamma_b}{Q_f}. \quad (13.49)$$

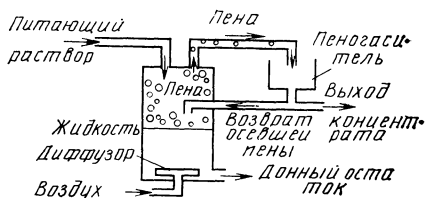


Рис. 13.48. Установка для пенного фракционирования в комбинированном режиме

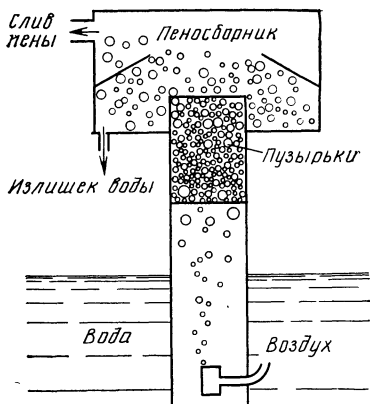


Рис. 13.49. Прямоточная установка для пенного фракционирования

Сравнение уравнений (13.46) с (13.48) и (13.47) с (13.49) показывает, что режим обогащения увеличивает концентрацию растворенного вещества в пене, но не оказывает влияния на его концентрацию в донном остатке.

Третий режим работы, называемый режимом отгонки, показан на рис. 13.47. Патрубок подачи питающего раствора расположен значительно выше поверхности раздела жидкость—пена, и раствор стекает по пене. При этом питающий раствор «омывает» воду, выносимую вверх с пеной, до тех пор, пока концентрация в ней не достигнет концентрации в питающем растворе. Идеальные условия работы установки в режиме отгонки описываются следующими уравнениями (Lemlich, 1968):

$$C_0 = C_f + \frac{GS\Gamma_f}{Q_0}; \quad (13.50)$$

$$C_b = C_f - \frac{GS\Gamma_f}{Q}, \quad (13.51)$$

где Γ_f — поверхностная избыточная концентрация в условиях равновесия с питающим раствором, г·моль/см²; Q — скорость потока донного остатка (отстоя), см³/с.

Режим отгонки очищает донный остаток (т. е. снижает концентрацию растворенного вещества в отстое).

Поскольку часто требуется, чтобы концентрация растворенного вещества была максимально высокой в пене и низкой в донном остатке, режимы обогащения и отгонки объединяют и такой режим называют комбинированным (рис. 13.48). Идеальные условия работы описываются следующими уравнениями (Lemlich, 1968):

$$C_{0l} = C_f + \frac{GS\Gamma_f}{Q_{0l}}; \quad (13.52)$$

$$C_b = C_f - \frac{GS\Gamma_f}{Q}. \quad (13.53)$$

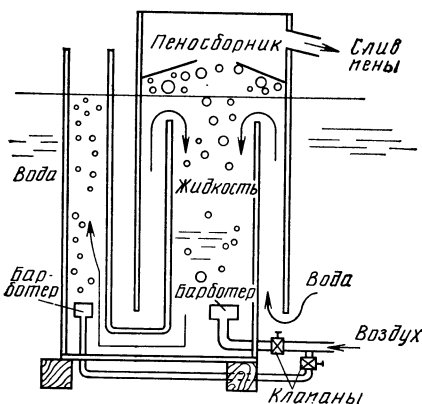


Рис. 13.50. Противоточная установка для пенного фракционирования

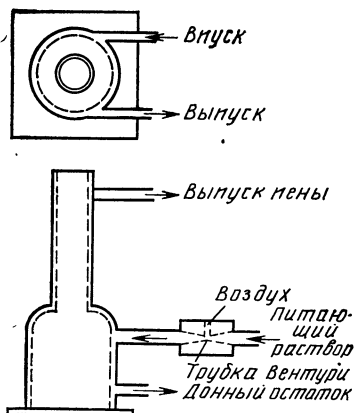


Рис. 13.51. Включение трубки Вентури в устройство для пенного фракционирования

По сравнению с простым комбинированным режимом дает обогащенную пену и обеспечивает более низкую концентрацию растворенного вещества в донном остатке.

Кроме рассмотренных выше четырех режимов работы по другой системе классификации (Spotte, 1970) существует прямоточное и противоточное пенное фракционирование. Установка для прямоточного фракционирования (рис. 13.49) напоминает эрлифт, так как воздух подается в нижнюю часть колонны и вместе с водой поднимается вверх. В противоточной установке (рис. 13.50) вода направляется вниз, а воздух идет вверх. Воздух и вода движутся в противоположных направлениях, что увеличивает продолжительность контакта между ними и эффективность установки.

Еще одна конструкция установки для пенного фракционирования (рис. 13.51) имеет наружную трубку Вентури или насадку, через которую воздух подается в воду, затем смесь воздуха и воды нагнетается в колонну. В такой установке необходим только насос для воды и сужение (т. е. трубка Вентури, сопло, насадка и т. п.), которое обеспечивало бы снижение атмосферного давления. Воздух в систему поступает для насоса, но необходимо некоторое падение давления в водоподающем трубопроводе. Соотношение воздуха и воды зависит от вида сужения и соотношения давлений в нем, а также от скорости потока воды.

Факторы, влияющие на эффективность работы установки. Параметры, влияющие на работу установки для пенного фракционирования, можно разделить на основные и второстепенные. К основным переменным относятся: вид вещества, используемого в качестве растворителя, газа и растворенного вещества; концентрация растворенного вещества, скорость потока газа; pH; температура; высота и диаметр колонны, заглубление впускного патрубка, режим работы и способ подачи воздуха.

К второстепенным переменным относятся: растворимость растворенного вещества; поверхностное натяжение; вязкость; равновесное соотношение; кинетика адсорбции; свойства пены и пузырьков.

Основные переменные. Характер химических веществ, используемых в установке, определяет поверхностную активность растворенного вещества и пенообразующую способность раствора. Свойства пены зависят от растворенного вещества, растворителя и газа. При фракционировании воды, в которой содержались культивируемые организмы, растворителем является вода, а газом — воздух. Растворенным веществом в этих водах могут быть белки, спирты, органические кислоты и т. п., а также такие неорганические вещества, как аммиак, фосфат, сульфаты и кальциевые соединения. Если в системах для культивирования используется морская вода, то соли вносят в раствор многочисленные неорганические ионы.

При удалении с помощью пенного фракционирования загрязнений необходимо, чтобы удаляемое растворенное вещество было поверхностно-активным или чтобы его можно было сделать поверхностно-активным добавлением соответствующего соединения. Пена должна быть достаточно стойкой, чтобы ее можно было удалить до оседания. Соединения, не обладающие поверхностной активностью, можно удалить с помощью фракционирования, если они вступают в химическую реакцию с образованием поверхностно-активного соединения или если они электростатически притягиваются к поверхности поверхностно-активного вещества. С помощью пенного фракционирования удаляются главным образом растворенные вещества, хотя в результате электростатического притяжения частиц к поверхности пузырьков или физического их захвата пеной может быть удалена и часть твердых примесей.

Значительное влияние на работу установки для пенного фракционирования оказывает концентрация растворенного вещества. Поскольку поверхностное натяжение часто логарифмически зависит от концентрации, изменения концентрации растворенного вещества (особенно при низких концентрациях) быстро снижают поверхностное натяжение. Это вызывает изменение поверхностной избыточной концентрации и пенообразующих характеристик раствора. На рис. 13.52 показана типичная зависимость между поверхностным натяжением и концентрацией, а на рис. 13.53 — между поверхностной избыточной концентрацией и концентрацией. Формы приведенных кривых типичны, но кривые, описывающие эти зависимости, могут иметь и другую форму. Пенное фракционирование дает наилучшие результаты при низких концентрациях, особенно при концентрациях ниже КМК.

Максимальная экстракция белков достигается при изоэлектрическом значении рН экстрагируемого белка (Rubin and Gaden, 1962). Поскольку разные белки имеют различные изоэлектрические значения рН, удаление белков из воды, в которой содержались культивируемые объекты, может привести к предпочтительной

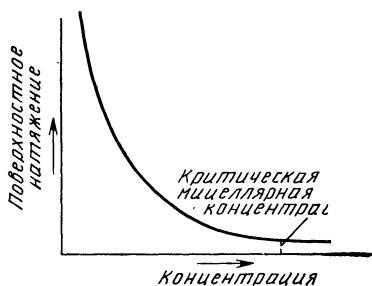


Рис. 13.52. Типичная зависимость поверхностного натяжения от концентрации детергента

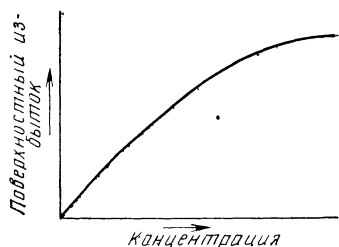


Рис. 13.53. Типичная зависимость поверхностного избытка от концентрации (Lemlich, 1968)

экстракции определенных белков. Чтобы определить вероятность экстракции отдельных белков, необходимо знать их изоэлектрические точки и рН воды.

Скорость потока газа влияет на площадь поверхности, доступной для адсорбции. Увеличение скорости потока газа увеличивает площадь поверхности до тех пор, пока при значениях скорости выше той, при которой образуется поверхность, пузырьки в заполненной жидкостью части колонны не начнут слипаться. Дальнейшее увеличение скорости потока газа лишь увеличит затраты на нагнетание воздуха с большей скоростью, но не повысит интенсивности экстракции. Вместе с тем увеличение скорости потока газа увеличивает скорость и уменьшает время стекания пены. Плотность пены увеличивается благодаря большему захвату жидкости. По той же причине уменьшается коэффициент обогащения (т. е. концентрация растворенного вещества в пене, деленная на концентрацию растворенного вещества в питающем растворе). По-видимому, в большинстве случаев превалирует последнее явление, так как коэффициент обогащения снижается с увеличением скорости потока газа. На скорость потока газа влияет также режим впуска: чем мельче пузырьки, тем больше отношение площади поверхности к объему. Размер пузырьков определяется размером впускного отверстия, свойствами раствора и степенью слипания пузырьков. В идеале все пузырьки должны иметь одинаковый размер и быть равномерно распределены в жидкости. На практике таких идеальных условий не бывает, но правильный расчет и регулирование скорости потока газа может обеспечить достаточное приближение к ним.

Температура частично определяет вязкость жидкости и поверхностное натяжение. Увеличение вязкости снижает скорость стекания пены и делает ее более сырой, а также снижает скорость подъема пузырьков через жидкость, хотя при температурах, наблюдаемых в системах аквакультуры, это имеет лишь второстепенное значение. Некоторые поверхностно-активные вещества не вспениваются или обладают пониженной вспениваемостью при всех температурах, кроме определенного диапазона, свойственно-

го данному соединению, поэтому изменением температуры можно иногда разделить два или несколько веществ, растворенных в одном растворителе. Для большинства соединений оптимальную температуру следует определять экспериментально (Rubin and Gaden, 1962).

Физические характеристики установки также влияют на ее работу. Влияние различных режимов работы на эксплуатационные параметры было рассмотрено выше. Увеличение высоты колонны способствует получению более сухой пены с повышенной концентрацией растворенного вещества при условии, что все остальные параметры остаются постоянными. Коун (Kown, 1971) показал, что при высоте свыше 30 см работа колонны при низких скоростях потока газа не улучшалась. В высоких колоннах слив пены происходит медленнее и пена более сухая, особенно при высоких скоростях газа. Диаметр колонны также влияет на ее работу. Коун (1971) также показал, что увеличение диаметра колонны (при остальных неизменных параметрах) уменьшало общую эффективность, поверхностную избыточную концентрацию и коэффициент обогащения. Этого следовало ожидать, так как с увеличением диаметра площадь поверхности на единицу объема в колонне уменьшалась (так как поток газа оставался постоянным). Для обеспечения высокой эффективности фракционирования необходима равномерная подача воздуха.

Второстепенные переменные. Низкая растворимость вещества способствует повышению эффективности установки. Создается впечатление, что чем менее растворимо вещество, тем быстрее и полнее оно перемещается к поверхности раздела фаз. Это вызывает увеличение концентрации поверхностно-активного вещества на поверхности раздела и ускоряет экстракцию.

Поверхностное натяжение также влияет на образование и оседание пузырьков. Влияние вязкости рассматривалось выше.

Здесь необходимо принимать во внимание два равновесных отношения: химическое равновесие между растворенными веществами и между растворителем и растворенными веществами; равновесие между концентрацией растворенного вещества в жидкости пены и его концентрацией в объеме раствора. В объеме раствора и на поверхности раздела газ — жидкость химическое равновесие неодинаково (Rubin and Gaden, 1962). Второе равновесие измеряют разными способами и выражают в концентрациях, коэффициентах обогащения и коэффициентах распределения. Рубин и Гейден (1962) отмечают, что в системах, содержащих только поверхностно-активные растворенные вещества, равновесные коэффициенты обогащения колеблются от 1 до 5, тогда как при разделении ионов металлов этот коэффициент может достигать 100.

Кинетика адсорбции также влияет на характеристики вспенивания. Уравнение Гиббса применимо только тогда, когда на поверхности раздела достигнуто равновесие. Однако поверхностное натяжение и, следовательно, поверхностная адсорбция могут со

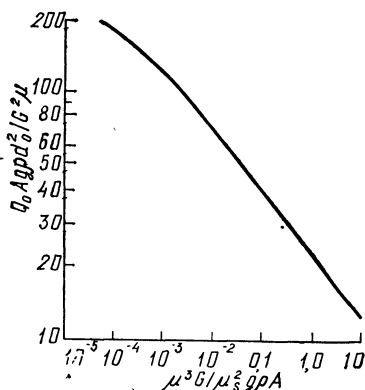


Рис. 13.54. Теоретическая кривая для определения скорости выхода пены из пеноотделительной установки (Lemlich, 1968)

временем изменяться. По-видимому, существует два типа этого явления — быстрое и медленное поверхностное старение. При быстром поверхностном старении равновесие достигается в пределах доли секунды. В случае медленного поверхностного старения равновесие может не достигаться в течение нескольких часов и даже дней. Большинство исследователей считают, что причиной этого является не диффузия. Этот факт еще не получил удовлетворительного объяснения (Rubin and Gaden, 1962).

Расчет установки. Для расчета пенной установки важными факторами являются концентрация в донном остатке (вытекающей воде) и сухость (или объем) пены. Для процесса концентрирования важным фак-

тором является также концентрация растворенного вещества в пене. Концентрация в донном остатке является показателем чистоты вытекающей воды. Сухость пены важна потому, что удаление больших объемов осевшей пены может быть затруднительным.

Гривс и Бхаттачария (Grieves and Bhattacharyya, 1965) вывели два расчетных уравнения. Одно устанавливает зависимость между изменением концентрации и рабочими параметрами, а второе между скоростью потока пены и рабочими параметрами:

$$C_f - C_b = A \left(\frac{G}{Q_f} \right)^B (C_f)^{D/T} (T)^E; \quad (13.54)$$

$$Q_0 = P (G)^R [\log (Q_f C_f) (T)^{K_1}], \quad (13.55)$$

где C_f — концентрация в питающей жидкости, мг/мл; C_b — концентрация в донном остатке, мг/мл; G — скорость потока газа, мл/мин при нормальной температуре и давлении; Q_f — скорость питающей жидкости, мл/мин; T — температура, °F; Q_0 — скорость потока пены, мл/мин; A, B, D, E, P, R, U, K_1 — постоянные.

Хотя уравнения (13.54) и (13.55) полезны, но постоянные зависят от вида растворенного вещества и используемой системы. Не зная этих констант, трудно применять эти уравнения для расчета.

Лемлих (Lemlich, 1968) применяет другую методику расчета. Его система основана на логарифмической зависимости (рис. 13.54) между $Q_0 Agpd^2_0 / G^2 \mu$ и $\mu^3 G / \mu_s^2 g \rho A$ (Q_0 — скорость потока пены, см³/с; A — горизонтальное поперечное сечение колонны, см²; g — ускорение силы тяжести, см/с²; ρ — плотность жидкости, г/см³; d_0 — средний диаметр пузырька, см [см. уравнение (13.56)]; G — скорость потока газа, см³/с; μ — вязкость, г/(см·с); μ_s — поверхностная вязкость, г/с).

$$d_0^2 = \left(\sum_{i=1}^n n_i d_i^3 \right) / \left(\sum_{i=1}^n n_i d_i \right), \quad (13.56)$$

где n_i — число пузырьков диаметром d_i в пробе пены (при слипании пузырьков пробу следует отбирать в верхней части колонны).

Поверхностную вязкость μ_s можно рассматривать как сопротивление натяжению на поверхности жидкости. Поверхностную вязкость лучше всего определять **опытным** путем. Для большинства поверхностно-активных веществ в воде комнатной температуры $\mu_s = 10^{-4}$ дин·с/см, или 10^{-4} г/с.

Если μ_s для данной установки найдена, все значения двух параметров приведенного на рис. 13.54 графика известны, за исключением скорости потока пены Q_0 , которую теперь можно вычислить. Таким образом, рис. 13.54 можно использовать для оценки скорости потока пены при различных скоростях потока газа и площадях поперечного сечения колонны. Методом проб и ошибок можно добиться приемлемого соотношения Q_0 , A и G .

Концентрацию донного остатка и пены можно оценить с помощью уравнений (13.46) — (13.53). Однако прежде необходимо знать поверхностную избыточную концентрацию Γ . Для особого случая, когда неионное поверхностно-активное вещество содержится в водном растворе при концентрациях ниже критической мицеллярной концентрации поверхностную избыточную концентрацию можно определить по уравнению (13.44) и графику зависимости поверхностного натяжения от концентрации. Часто считают, что основные поверхностно-активные вещества находятся в виде монослоя на границе фаз. В таком случае Γ относительно постоянна и равна $3 \cdot 10^{-10}$ г·моль/см². Это неверно для следов ионов и для случаев удаления второстепенного поверхностно-активного вещества с помощью основного (Lemlich, 1968).

Трудности, связанные с использованием описанной выше методики расчета, дают повод для размышления. Использование уравнений (13.54) и (13.55) требует определения всех основных констант, а для этого необходимо проводить лабораторные эксперименты. Чтобы использовать методику Лемлиха (Lemlich, 1968), необходимо знать размер пузырьков [уравнение (13.56)]. Для этого следует провести серию лабораторных опытов на самой установке или на ее модели. Размер пузырьков пены можно определить так: быстро заморозить пену углекислым газом, сделать срез и измерить диаметр пузырьков либо сфотографировать работающую колонну и определить размер пузырьков по фотоснимкам. К сожалению, пузырьки у вертикальной стенки колонны, т. е. именно те, которые видны на фотоснимках, не типичны для пузырьков внутри колонны из-за эффекта стенки. Кроме того, при использовании методики Лемлиха (1968) необходимо определять значение поверхностной избыточной концентрации. Во многих

случаях эту величину можно считать постоянной. Когда же этого сделать нельзя, для получения кривой зависимости поверхностной избыточной концентрации от концентрации необходимо провести серию лабораторных испытаний. Необходимо также помнить, что уравнение Гиббса верно только для условий равновесия, а во многих установках равновесие может и не достигаться.

Пенное фракционирование в системах аквакультуры. Установки для пенного фракционирования применяются во многих системах культивирования (Dwivedy, 1973; Wheaton, 1975; Lush, 1976; Lomax, 1976; Spotte, 1970). Дживеди (Dwivedy, 1973) вывел уравнение для описания количества азота, остающегося в искусственной морской воде после работы установки пенного фракционирования в течение времени t :

$$N = N_i \exp - [0,48N_i]^{9,25 \cdot 10^{-2t}}, \quad (13.57)$$

где N — общий азот, остающийся в воде после фракционирования в течение времени t , мг/л; N_i — начальная концентрация общего азота в начале работы установки, мг/л; t — время, ч.

Поскольку в системе, с которой работал Дживеди, вода совершала в час 7,5 оборотов, уравнение (13.57) можно использовать для любой установки пенного фракционирования путем подстановки $7,5 t_0$ вместо t [t_0 — число оборотов воды (Dwivedy, 1973)].

Содержание общего азота в системе составило приблизительно 6 мг/л, а ХПК и БПК — около 10 мг/л (Dwivedy, 1967).

Дживеди (1973) также показал, что при пенном фракционировании в системе поддерживалось более высокое значение рН, чем то, которое наблюдалось в контрольной системе без пенного фракционирования. Это объясняется тем, что при пенном фракционировании органические кислоты или исходное органическое вещество удаляется до образования органических кислот*. рН контрольной среды составлял в среднем около 7, а в бассейне с установкой для пенного фракционирования рН составлял в среднем 7,7—7,9. Следует иметь в виду, что в системах, с которыми работал Дживеди, живые организмы не содержались, а концентрации органических примесей обеспечивалась внесением мертвых устриц или смеси устричного мяса.

Для максимального удаления органического вещества требовалось около 15 оборотов воды через установку независимо от его первоначальной концентрации (Dwivedy, 1973).

Во всех экспериментах Дживеди концентрация аммиака была низкой. Это объясняется не непосредственным удалением аммиака с помощью установки, а, по-видимому, удалением самих нитрифицирующих бактерий (так как в результате такой обработки происходит снижение БПК и ХПК). Однако предварительные эксперименты Лоусона и Уитона (Lawson and Wheaton, 1975)

* При пенном фракционировании увеличение рН происходит в результате удаления CO_2 вместе с пузырьками воздуха. Сходный эффект наблюдается при барботаже и работе эрлифта. — *Прим. ред.*

показали, что пенное фракционирование способно и непосредственно уменьшать концентрацию аммиака. К сожалению, в этих экспериментах не удалось выяснить, каким образом был удален аммиак — аэрацией или пенным фракционированием.

Дживеди (1973) также показал, что в его установке с трубкой Вентури общее число бактерий в экспериментальном бассейне снижалось за 2,5 ч с 22100 до 220 в 1 мл, тогда как в контроле число бактерий на 1 мл увеличилось с 28150 до 29100. Чашечный подсчет в конце эксперимента показал присутствие в концентрированной пене бактерий в количестве 1115772 в 1 мл.

Пенное фракционирование дает хорошие результаты в солоноватоводных системах, но применимо и в пресноводных в присутствии относительно высоких концентраций органических веществ. Есть основания предполагать, что с помощью пенного фракционирования можно удалять некоторые микроэлементы из соленой воды. Эта проблема требует дальнейших исследований.

БИОЛОГИЧЕСКИЕ ФИЛЬТРЫ

Под биологической фильтрацией понимается бактериальное превращение органических азотистых соединений в нитраты. Стадии этого процесса известны под общим названием азотного цикла (см. рис. 6.1). Хотя азотный цикл начинается с превращения азотсодержащих органических соединений в аммиак, желательно, чтобы первая стадия уже закончилась, прежде чем материал поступит на биологический фильтр. Однако по причинам, которые будут изложены ниже, аммонификация и дезаминирование частично происходят во всех биологических фильтрах, если только материал поступает на фильтр не из чисто неорганического источника. Основным назначением биологического фильтра является превращение аммиака в нитриты, а нитритов в нитраты. Эти реакции имеют большое значение при культивировании водных организмов, поскольку аммиак — высокотоксичный продукт обмена, непосредственно выделяемый многими культивируемыми организмами, и побочный продукт жизнедеятельности многих бактерий. Нитриты несколько менее токсичны, чем аммиак в форме NH_3 , хотя для некоторых видов и они токсичны в концентрациях менее 2,5 мг/л (Westin, 1973). Нитраты для большинства водных организмов считаются относительно нетоксичными. Например, Кнепп и Аркин (Knapp and Arkin, 1972) показали, что в случае с канальным сомиком (высокотолерантным видом) LD^*_{50} аммиака составляла 37,5 мг/л, тогда как нитраты при концентрации до 400 мг/л не оказывали влияния ни на пищевую активность, ни на темп роста рыбы.

Устройство фильтра. Биологический фильтр обычно представляет собой пористый твердый слой, в котором содержатся нитрифицирующие бактерии. Бактерии извлекают необходимые им пи-

* Концентрация, при которой гибнут 50 % особей. — Прим. ред.

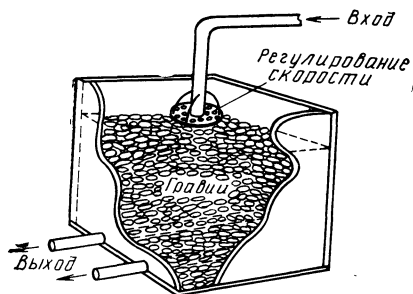


Рис. 13.55. Простой нисходящий биологический фильтр

тательные вещества и кислород из воды, протекающей через фильтрующий слой. Простой биологический фильтр представляет собой ящик; наполненный гравием. Вода поступает сверху, протекает через фильтрующий слой и вытекает через дренажные трубы на дне ящика (рис. 13.55).

Существует несколько типов биологических фильтров. Погружные фильтры типа показанных на рис. 13.55 — это фильтры, у которых фильтрующий слой полностью погружен в воду. Погружные фильтры подразделяются на нисходящие и восходящие в зависимости от направления тока воды. В нисходящем фильтре вода поступает сверху и вытекает снизу, а в восходящем фильтре поток воды направлен снизу вверх. Иногда применяют также погружные фильтры с горизонтальным током воды. Капельные фильтры — это биологические фильтры, в которых уровень воды поддерживается ниже дна фильтра. Вода поступает сверху и образует водяную пленку на поверхности твердой фазы, но не заполняет пор между частицами фильтрующего слоя. Это обеспечивает нисходящий поток воды и естественную аэрацию в результате прохождения воздуха через фильтр.

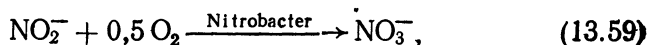
Наиболее эффективными являются, по-видимому, восходящие погружные и капельные фильтры. В капельных фильтрах поступление кислорода обеспечивается естественной конвекцией воздуха, и фильтры засоряются твердыми веществами. Однако продолжительность удерживания можно регулировать только путем увеличения толщины фильтрующего слоя. Восходящие затопленные фильтры меньше других погружных фильтров засоряются твердыми веществами. Они позволяют также регулировать продолжительность удерживания в широком диапазоне путем изменения скорости протекания воды.

Реакции и кинетика. Нитрификация является двухэтапным процессом превращения аммония (NH_4^+) в нитриты (NO_2^-), а нитритов в нитраты (NO_3^-). Первый этап этого процесса (превращение NH_4^+ в NO_2^-) осуществляется автотрофными бактериями рода *Nitrosomonas*, которые в присутствии кислорода способны окислять аммоний до NO_2^- , используя в качестве источника энергии приблизительно 270 кДж/моль (McHarness and McCarty, 1973):



На втором этапе процесса нитрификации при окислении нитритов до нитратов выделяется примерно 73 кДж/моль (McHarness and McCarty, 1973). Эта реакция осуществляется бактериями ро-

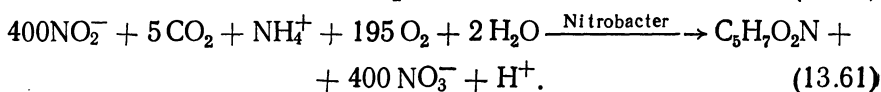
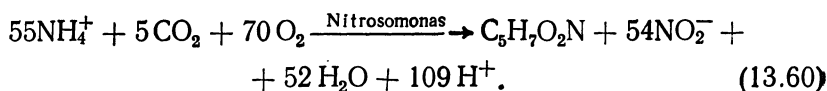
да *Nitrobacter*, которые используют выделяющуюся энергию на процессы обмена веществ:



Реакции (13.58) и (13.59) требуют значительного количества кислорода. Станкевич (Stankewich, 1972) подсчитал, что стехиометрическая потребность в кислороде для превращения $\text{NH}_3\text{—N}$ в $\text{NO}_2\text{—N}$ составляет 3,43 кг кислорода на 1 кг окисленного $\text{NH}_3\text{—N}$. Превращение $\text{NO}_2\text{—N}$ в $\text{NO}_3\text{—N}$ требует 1,14 кг кислорода на 1 кг окисленного $\text{NO}_2\text{—N}$. Таким образом, превращение 1 кг $\text{NH}_3\text{—N}$ в $\text{NO}_3\text{—N}$ требует 4,57 кг кислорода. Поскольку для работы биологического фильтра необходимо, по крайней мере, стехиометрическое количество кислорода, то поступление кислорода может стать фактором, ограничивающим нитрификационные процессы, протекающие в биофильтре.

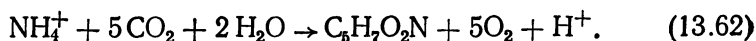
Уравнения (13.58) и (13.59) описывают химические реакции, используемые бактериями *Nitrosomonas* и *Nitrobacter* для получения энергии. Бактерии утилизируют эту энергию, углекислый газ и кислород для продуцирования органических соединений, необходимых для роста клеток и обмена веществ. Объем массы клеток, образуемой растущими бактериями, имеет большое значение для биологических фильтров, поскольку отмирающие бактерии образуют взвешенные в воде частицы, которые закупоривают фильтр, что приводит к образованию в нем анаэробных участков, большим потерям напора протекающей через фильтр воды и другим нежелательным последствиям.

Реакции нитрификации — ассимиляции для нитрифицирующих бактерий описываются следующими уравнениями (Анон, 1971):



Исходя из этих уравнений, при окислении 1 кг $\text{NH}_3\text{—N}$ до $\text{NO}_2\text{—N}$ образуется 147 г клеток *Nitrosomonas* и 20 г клеток *Nitrobacter*. К счастью, по сравнению с гетеротрофными бактериями нитрифицирующие бактерии продуцируют небольшую массу клеток на массу окисленного субстрата, и благодаря этому фильтры не так засоряются, если количество органических веществ, поступающих на нитрификационный фильтр, сведено к минимуму.

Мид (Meade, 1974), основываясь на работе Хога и Маккарти (Haug and McCarty, 1971), приводит следующее уравнение для реакции синтеза клеток автотрофных организмов:



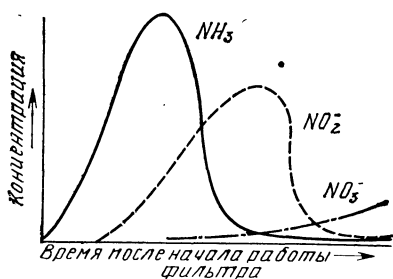
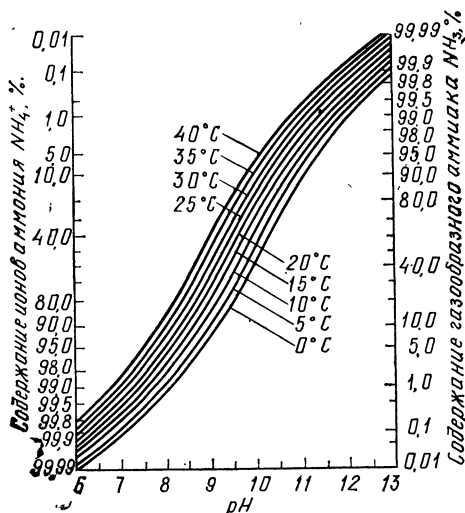


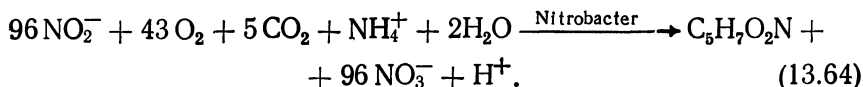
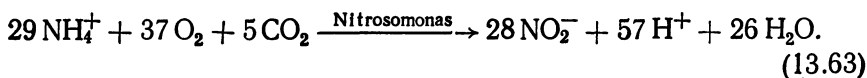
Рис. 13.56. Нитрификационные кривые

Рис. 13.57. Влияние pH и температуры на распределение аммиака и ионов аммония в воде (Liao et al., 1972)



В этой реакции углекислота частично обеспечивает потребность в кислороде, являясь также источником углерода.

Для описания реакций синтеза клеток и метаболических потребностей нитрифицирующих бактерий Мид (1974) предложил уравнения, которые основаны на коэффициентах выхода, вычисленных Хогом и Маккарти (1971):



Исходя из этих уравнений, *Nitrosomonas* потребляет 3,02 кг кислорода на каждый килограмм $\text{NH}_3\text{—N}$, окисленный до $\text{NO}_2\text{—N}$, а *Nitrobacter* — 1,02 кг кислорода на килограмм $\text{NO}_2\text{—N}$, окисленный до $\text{NO}_3\text{—N}$. Таким образом, общее потребление кислорода составляет 4,04 кг на килограмм $\text{NH}_3\text{—N}$, окисленный до $\text{NO}_3\text{—N}$. Однако, поскольку это отношение зависит от возраста культуры, количество кислорода, необходимое для полного окисления 1 кг $\text{NH}_3\text{—N}$ до $\text{NO}_3\text{—N}$, составляет от 4 до 4,6 кг.

Уравнения (13.60) и (13.61) аналогичны уравнениям (13.63) и (13.64), за исключением коэффициентов. Следует помнить, что уравнения (13.60) и (13.61) описывают синтез клетки, связанный с окислением $\text{NH}_3\text{—N}$ до $\text{NO}_2\text{—N}$, тогда как уравнения (13.63) и (13.64) описывают синтез и обмен веществ клетки.

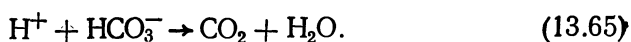
На рис. 13.56 показана зависимость между содержанием аммиака, нитритов и нитратов на начальном этапе работы биологического фильтра. В начале работы популяция нитрифицирующих бактерий либо малочисленна, либо отсутствует вовсе, поэтому

посадка рыбы в систему приведет к быстрому увеличению концентрации аммиака в воде. Этот момент является критическим, так как даже низкие концентрации аммиака могут оказаться губительными для культивируемых организмов. Снижение концентрации аммиака обычно сигнализирует о появлении жизнестойкой популяции *Nitrosomonas*, превращающей аммиак в нитриты. Однако такое предположение может привести к опасной самоуспокоенности. Обычно в биологическом фильтре присутствуют как гетеротрофные, так и автотрофные (нитрифицирующие) бактерии. Гетеротрофные бактерии характеризуются более ускоренным временем генерации (т. е. временем роста, размножения и продуцирования многочисленной популяции), чем автотрофные бактерии, поэтому гетеротрофные бактерии, которые используют источник простого органического углерода, но нуждаются в неорганическом азоте для обмена веществ, первоначально становятся доминирующими в фильтре и утилизируют продуцируемый в системе аммиак. Снижение содержания органического углерода подавляет рост гетеротрофных бактерий. Следовательно, первоначальное снижение концентрации аммиака может указывать не на нитрификацию, а на присутствие многочисленной популяции гетеротрофных бактерий. К счастью, это не часто наблюдается в аквакультуре.

Увеличение популяции *Nitrosomonas* приводит к возрастанию концентрации нитритов, которая достигает максимума, а затем начинает снижаться по мере роста популяции *Nitrobacter*, превращающей нитриты в нитраты. Увеличение концентрации нитритов также представляет опасность, так как они токсичны для рыб и многих других водных организмов. Систематический контроль за концентрацией нитритов и аммиака позволяет убедиться в том, что идет процесс нитрификации.

В любой водной системе аммиак присутствует в форме NH_4^+ и NH_3 , поскольку между этими двумя формами в воде существует равновесие. Неионная форма (NH_3) токсична для большинства водных организмов в концентрациях 1 мг/л и ниже. Особенно чувствительны к NH_3 лососи, на которых неблагоприятное воздействие оказывает длительное пребывание в воде с концентрацией NH_3 0,006 мг/л (Burrows, 1964). Равновесие между NH_3 и NH_4^+ зависит от pH (рис. 13.57). При pH менее 7 концентрация NH_3 невелика и риск токсичности снижается. При более высоких значениях pH токсичность NH_3 возрастает. Следует отметить, что в системах с соленой морской водой pH обычно составляет от 7,5 до 8,3, а в пресноводных — от 6,5 до 7,8.

В результате нитрификации [уравнение (13.58)] и синтеза [уравнения (13.63) и (13.64)] образуются ионы водорода, поэтому во время нитрификации pH, как правило, снижается. В водных растворах ионы водорода нейтрализуются ионами бикарбоната в воде (при pH менее 8,5) (Haug and McCarty, 1971):



Конечным результатом уравнения (13.65) является снижение концентрации бикарбоната и увеличение содержания углекислоты, а оба эти условия способствуют снижению рН. Хог и Маккарти (1971) подсчитали, что на нейтрализацию ионов водорода, образующихся при окислении 1 кг $\text{NH}_3\text{—N}$, идет примерно 7,13 кг бикарбоната в виде CaCO_3 . Расчеты с учетом равновесия угольной кислоты в пресной воде показывают, что если вся углекислота, образующаяся во время нейтрализации, остается в растворе, а рН должен быть выше 6,0, то количество $\text{NH}_3\text{—N}$ (в мг) на литр, которое может быть окислено, равно примерно 0,1 щелочности, выраженной в CaCO_3 (Haug and McCarty, 1971). Однако в большинстве замкнутых систем происходит частичное удаление углекислоты (например, в процессе аэрации), и обычно наблюдается некоторое снижение рН, поэтому правило «0,1 щелочности» дает консервативную оценку. Тем не менее для поддержания рН на необходимом уровне в воду с низкой щелочностью обычно необходимо добавлять карбонат или бикарбонат. Это часто осуществляется путем использования в качестве фильтрующего слоя карбонатных пород.

рН системы оказывает также непосредственное влияние на нитрифицирующие бактерии. По вопросу о влиянии рН на скорость окисления нитрифицирующими бактериями существуют различные мнения. Хог и Маккарти (1971) обнаружили, что скорость окисления $\text{NH}_3\text{—N}$ неадаптированными культурами была постоянной только при рН 6,8—8. При рН ниже 6,8 скорость окисления $\text{NH}_3\text{—N}$ быстро уменьшалась с понижением рН. Для рН выше 8 опыты не проводились. Энгл и Александер (Engle and Alexander, 1958) наблюдали для *Nitrosomonas europaea* постоянную скорость окисления в диапазоне рН от 7,5 до 9, а Майерхоф (Myerhof, 1916) — то же для бактерий *Nitrosomonas*, только в диапазоне от 8,5 до 8,8. Все данные, за исключением данных Майерхофа, свидетельствуют о том, что, по-видимому, наибольшую и относительно постоянную скорость окисления бактерии *Nitrosomonas* имеют при рН от 7 до 9. Однако Хог и Маккарти (1971) показали, что с течением времени фильтры могут акклиматизироваться к более низким значениям рН. Они продемонстрировали, что через 10 дней после снижения рН до 6 бактериальная скорость окисления $\text{NH}_3\text{—N}$ до $\text{NO}_2\text{—N}$ была равна скорости, наблюдавшейся в оптимальных пределах рН. Однако снижение рН до 5,5 создало условия, к которым нитрифицирующие бактерии не смогли адаптироваться даже с течением времени.

По вопросу о толерантности *Nitrobacter* к колебаниям рН имеется, по-видимому, меньше данных. Майерхоф (1916) обнаружил, что *Nitrobacter* осуществлял окисление с наибольшей скоростью только при рН от 8,4 до 9,2. Данные по очистке бытовых стоков (Nitrification and Denitrification Facilities, 1973) показывают, что оптимальные скорости окисления наблюдались в области рН от 8,4 до 8,6. Дудлз и Ричардсон (Duddles and Richardson, 1973) сообщают об удалении 80—90 % $\text{NH}_3\text{—N}$ из городских стоков с по-

мощью капельного фильтра с пластмассовым наполнителем при pH 7—8. Опыт работы с нитрифицирующими фильтрами в рыбоводстве свидетельствует о том, что скорость превращения $\text{NO}_2\text{—N}$ в $\text{NO}_3\text{—N}$ достаточно высока для поддержания приемлемо низких концентраций $\text{NO}_2\text{—N}$ при pH 6,5—8,5 (Wheaton, 1973; Lomax, 1975).

Температура также влияет на скорость нитрификации в биологических фильтрах. С понижением температуры скорость реакции уменьшается. Поскольку температура является одним из расчетных параметров, ее влияние рассмотрено ниже, в разделе «Расчет биологических фильтров».

Хог и Маккарти (1971) показали, что при условии обеспечения стехиометрических потребностей в кислороде скорость нитрификации не зависит от концентрации кислорода. Однако при концентрациях кислорода ниже стехиометрических потребностей скорость реакции быстро уменьшается (рис. 13.58).

Расчет биологических фильтров. Существует, по крайней мере, две методики расчета биологических фильтров. Одна из них разработана Лиао и Майо (Liao and Mayo, 1974) с использованием результатов работ других исследователей и собственных данных. Вторая методика расчета, также основанная на результатах других исследователей и самого автора, опубликована Списом (Spence, 1973). Хотя работы Лиао и Майо (1974) и Списа (1973) не дают возможности получить полное представление об обоснованности их методик, тем не менее совершенно очевидно, что обе они базируются на небольшом количестве данных, относящихся главным образом к работам с форелью и лососем (холодолюбивые пресноводные виды), и могут иметь лишь ограниченное применение. Какой-либо общей системы расчетных уравнений для биологических фильтров, по-видимому, не существует, поэтому данный раздел нельзя считать исчерпывающим, хотя в нем содержатся наиболее ценные данные, имеющиеся по этому вопросу.

Имеется ряд уравнений, широко используемых для расчета погружных и капельных нитрифицирующих фильтров для городских станций очистки воды (Gotaas and Galler, 1973). Однако мнения о том, какое из них является наилучшим, расходятся. Поскольку основным назначением биологического (или нитрифицирующего) фильтра является превращение аммиака в нитрат, важное значение имеет концентрация аммиака в поступающей на фильтрацию воде. Городские стоки характеризуются концентрациями аммиака 10 мг $\text{NH}_3\text{—N}$ /л и выше. Для рыбоводных целей допустимы значительно более низкие концентрации аммиака — 1 мг $\text{NH}_3\text{—N}$ /л или менее для лосося и форели, хотя другие виды



Рис. 13.58. Зависимость интенсивности нитрификации от стехиометрической потребности в кислороде (McCarthy, 1971)

(например, сомик) могут переносить и более высокие концентрации. В литературе не содержится сведений о том, зависит ли скорость нитрификации от концентрации $\text{NH}_3\text{—N}$ в поступающей на фильтр воде. Есть основания полагать, что эта зависимость проявляется при низких концентрациях, но не заметна при более высоких.

Первая методика расчёта. Методика расчёта, разработанная Лиао и Майо, в обобщенном виде изложена в их работе 1974 г., а более подробно в работе 1972 г. На основании работ с форелью эти исследователи вывели следующую систему:

$$N_a = 0,0289 F_1; \quad (13.66)$$

$$N_n = 0,024 F_1; \quad (13.67)$$

$$P = 0,0162 F_1; \quad (13.68)$$

$$SS = 0,52 F_1; \quad (13.69)$$

$$БПК = 0,60 F_1; \quad (13.70)$$

$$ХПК = 1,89 F_1, \quad (13.71)$$

где N_a — скорость выделения аммиака при температуре 10—15 °C, кг $\text{NH}_4\text{—N}$ на 100 кг рыбы в сутки; N_n — скорость образования нитрата при температуре 10—15 °C, кг $\text{NO}_3\text{—N}$ на 100 кг рыбы в сутки; P — скорость образования фосфата при температуре 10—15 °C, кг $\text{PO}_4\text{—P}$ на 100 кг рыбы в сутки; SS — скорость образования взвешенного твердого вещества при температуре 10—15 °C, кг взвешенного вещества на 100 кг рыбы в сутки; $БПК$ — биохимическое потребление кислорода при температуре 10—15 °C, кг БПК на 100 кг рыбы в сутки; $ХПК$ — химическое потребление кислорода при температуре 10—15 °C, кг ХПК на 100 кг рыбы в сутки; F_s — интенсивность кормления, кг корма на 100 кг рыбы в сутки.

Хотя согласно соотношениям (13.66)—(13.71) при нулевой интенсивности кормления продукты обмена не образуются, это не так, поскольку продукты обмена являются результатом катаболизма тканей тела. Следовательно, эти уравнения неприменимы при низкой интенсивности кормления, когда рыбы начинают фактически голодать. Во всяком случае в промышленном рыбоводстве такой низкой интенсивности кормления быть не должно.

Уравнения (13.66)—(13.71) дают оценку скорости образования продуктов обмена для форели в системах с рециркуляцией до 90 % воды. Они были выведены в результате работ по выращиванию форели при температуре 10—15 °C и плотности посадки до 28,4 кг на 1 м³ воды в бассейне, не считая воду в других частях системы. Лиао и Майо (Liao and Mayo, 1970) не претендуют на достоверность этих уравнений для других условий.

Вторым важным параметром, который необходим при расчете фильтра, является интенсивность потребления кислорода рыбой. Лиао (Liao, 1971) предлагает следующие уравнения для вычисления интенсивности потребления кислорода лососевыми:

$$Q_c = K_2 T^a W^b, \quad (13.72)$$

где O_c — интенсивность потребления кислорода, фунты O_2 на 100 фунтов рыбы в сутки; K_2 — постоянная скорости; T — температура, °F; a , b — наклоны кривых; W — вес рыбы, фунт.

Постоянные K_2 , a и b приведены в табл. 13.5. Следует отметить, что они действительны только для лосося и форели. Величины, входящие в уравнение (13.72), выражены в фунтах, так

Таблица 13.5. Значения K_2 a и b из уравнения (13.72) (Liao et al., 1972)

Вид	Температура, °F	K_2	a	b
Лосось	Менее 50	$7,2 \cdot 10^{-7}$	3,200	—0,194
	Более 50	$4,9 \cdot 10^{-5}$	2,120	—0,194
Форель	Менее 50	$1,90 \cdot 10^{-6}$	3,130	—0,138
	Более 50	$3,05 \cdot 10^{-4}$	1,855	—0,138

как имеющихся данных недостаточно для пересчета постоянных в единицы международной системы СИ.

Концентрацию растворенного кислорода в воде, поступающей в систему аквакультуры, можно рассчитать по следующему уравнению (Liao et al., 1972):

$$C_i = \left(\frac{132S}{T^{0,625}} \right) \left(\frac{760}{760 + E_1/32,8} \right), \quad (13.73)$$

где C_i — концентрация кислорода при температуре воды T (в °F) и высоте над уровнем моря E_1 (в футах), мг/л; S — коэффициент насыщения, обычно он не превышает 0,95.

Пропускная способность системы (Liao et al, 1972)

$$L_o = \frac{0,14 (C_e - C_m)}{O_c}, \quad (13.74)$$

где L_o — пропускная способность, кг рыбы/(л·мин); C_e — концентрация растворенного кислорода при температуре T и высоте над уровнем моря E_1 , мг/л; C_m — минимальная допустимая концентрация кислорода в пруду, мг/л; O_c — интенсивность потребления кислорода, кг O_2 на 100 кг рыбы.

Пайпер (Piper, 1970) вывел выражение для расчета пропускной способности системы, основанное на длине и весе рыбы,

$$L_o = \frac{21,2W}{(L)(I)}, \quad (13.75)$$

где L_o — плотность посадки; L — длина рыбы, см; I — расход, л/мин; W — заданный допустимый вес рыбы, кг.

При расчете плотности посадки Пайпер исходил из следующих предположений: пропускная способность системы ограничена потреблением кислорода и накоплением продуктов обмена; количество потребляемого кислорода и количество продуктов обмена

пропорциональны количеству потребляемого корма. Следовательно, определив плотность посадки для рыб любой длины, можно с помощью уравнения (13.75) рассчитать вес рыбы данной длины, который может выдерживать система, перестроив уравнение так, чтобы W оказался в левой его части. Уравнение (13.75), по-видимому, применимо к лососю и форели.

Следует также отметить, что ни уравнение (13.74), ни уравнение (13.75) не учитывает влияния накопления продуктов обмена веществ в замкнутой системе.

Лиао и Майо (Liao and Mayo, 1972) вывели уравнение для определения концентрации продуктов обмена в воде, выходящей из системы с частичной циркуляцией воды, оборудованной био-фильтром:

$$C = \frac{1}{1 - R + RE}, \quad (13.76)$$

где R — количество циркулируемой воды, %; E — количество продуктов обмена, задерживаемых при одном проходе через фильтр, %; C — концентрация продуктов обмена в воде, выходящей из системы, отнесенная к их концентрации в воде, прошедшей через фильтр.

Таким образом, $C=1,0$ при одном проходе через фильтр. Результаты решения уравнения для C при различных значениях R для системы без фильтра (т. е. $E=0$) приведены в табл. 13.6.

Таблица 13.6. Концентрация продуктов обмена в системах с частичной рециркуляцией воды без фильтра

Количество рециркулируемой воды, %	C	Количество рециркулируемой воды, %	C
0	1,00	60	2,50
10	1,11	70	3,33
20	1,25	80	5,00
30	1,43	90	10,00
40	1,67	99	100,00
50	2,00	100	Безграничная

Из таблицы видно, что стабилизированная концентрация продуктов обмена в системе с рециркуляцией без фильтрации рециркулируемой воды логарифмически возрастает с увеличением количества рециркулируемой воды. С увеличением эффективности фильтрации (т. е. количества продуктов обмена, удаляемых при рециркуляции) стабилизированная концентрация снижается. Например, при 100 %-ной рециркуляции и 50 %-ной эффективности фильтра $C=2,0$. Следовательно, для поддержания заданной концентрации продукта обмена (например, аммиака) эффективность фильтрации должна возрастать с увеличением количества рециркулируемой воды.

Лиано и др. (1972) вывели также зависимость количества образующегося аммиака N_a от потребления кислорода O_c [уравнение (13.77) или (13.78)]:

$$N_a = 0,0071 + 0,0455 O_c; \quad (13.77)$$

$$N'_a = -0,00042 + 0,0545 O'_c, \quad (13.78)$$

где N'_a — количество аммиака, выделяющееся при температуре 10—15 °С, кг $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ на 1 кг корма в сутки; O'_c — количество потребляемого кислорода при температуре 10—15 °С, кг O_2 на 1 кг корма в сутки.

Уравнения (13.77) и (13.78) выведены при следующих условиях: длина форели 7,6—27,9 см; температура воды 10—15 °С; скорость воды 15—30 см/с; интенсивность кормления вычислялась по формуле Батербау и Уиллоуби (Buterbaugh and Willoughby, 1967).

Лиано и др. (1972) обнаружили, что окисление аммиака в фильтре зависит от содержания органических и питательных веществ, гидравлической нагрузки, температуры, pH, концентрации кислорода и времени удерживания. Следовательно, для расчетных целей необходимо установить зависимость между этими переменными.

Ниже приведены зависимости между окислением аммиака и его концентрацией для капельного фильтра и двух восходящих биологических фильтров при разном времени удерживания (Liao et al., 1972).

Капельный фильтр

при времени удерживания в среде, равном 0,46 ч,

$$N_{AR} = 0,489 A_L; \quad (13.79)$$

при времени удерживания в среде, равном 0,294 ч,

$$N_{AR} = 0,258 A_L. \quad (13.80)$$

Восходящий фильтр № 1

при времени удерживания в среде 0,33 ч

$$N_{AR} = 0,2533 A_L; \quad (13.81)$$

при времени удерживания в среде 0,294 ч

$$N_{AR} = 0,2227 A_L. \quad (13.82)$$

Восходящий фильтр № 2

при времени удерживания в среде 0,206 ч

$$N_{AR} = 0,1811 A_L, \quad (13.83)$$

где N_{AR} — скорость окисления аммиака в фильтре при указанном времени удерживания, кг $\text{NH}_4^+ - \text{N}/(\text{м}^2 \cdot \text{сут}) 10^{-5}$; A_L — концентрация аммиака, кг $\text{NH}_4^+ - \text{N}/(\text{м}^2 \cdot \text{сут}) 10^{-5}$.

$$\text{Время удерживания} = \frac{[\text{объем среды (м}^3\text{)}] (\text{доля пор})}{\text{скорость потока (м}^3\text{/ч)}} \quad (13.84)$$

$$\text{Доля пустот} = \frac{\text{объем пор в фильтрующем слое}}{\text{общий объем фильтрующего слоя}}. \quad (13.85)$$

Уравнения (13.79)—(13.83) выведены при следующих условиях: температурный диапазон 10—15 °С; гидравлическая нагрузка 1,0—1,7 л/с на 1 м² горизонтальной поверхности фильтра; рН 7,5—8,0; наполнитель фильтра — пластмассовые кольца Коха* размером 8,75 см.

Кроме того, максимальная концентрация аммиака в воде не должна превышать 97,6·10⁻⁵ кг NH₄—N/(м²·сут). Лиао и др. (1972) установили, что при более высоких концентрациях органические вещества, содержащиеся в воде, снижают нитрификационную способность фильтра.

Было показано, что гидравлическая нагрузка в пределах от 1,0 до 1,7 л/с на 1 м² поверхности фильтра не влияет на скорость окисления аммиака в фильтре (Liao et al., 1972). Следовательно, основным параметром, влияющим на интенсивность удаления аммиака, является время удерживания. Этого и следовало ожидать, так как нитрифицирующие бактерии характеризуются более продолжительным временем генерации по сравнению с большинством гетеротрофных бактерий (Meade, 1974).

Зависимость между интенсивностью окисления аммиака и временем удерживания при разной концентрации аммиака имеет следующий вид (Liao et al., 1972):

$$N_{AR} = 0,96 A_L t_m, \quad (13.86)$$

где N_{AR} — скорость окисления аммиака в фильтре при температуре 10—15 °С, кг NH₄—N/(м²·сут); A_L — концентрация аммиака, кг NH₄—N/(м²·сут); t_m — время удерживания, ч.

Перестроив уравнение (13.86), получим

$$N_{AR}/A_L = E_A = 0,96 t_m, \quad (13.87)$$

где E_A — эффективность окисления аммиака при температуре 10—15 °С.

Уравнение (13.87) выведено при следующих условиях: время удерживания 0,206—0,46 ч; гидравлическая нагрузка менее 101 л/(мин·м²); температура воды 10—15 °С; концентрация аммиака около 1 мг NH₄—N/л и менее; интенсивность поступления аммиака менее 97,6 кг NH₄—N/(м²·сут).

Весьма желательно было бы расширить диапазон температур уравнения (13.87). Для этого необходимо установить зависимость между константой скорости нитрификации K и температурой. Это выражение можно было бы подставить в уравнение (13.87) вместо существующей константы скорости (т. е. 0,96).

Зависимость между скоростью нитрификации и температурой выведена несколькими исследователями. Лиао и др. (1972) ссылаясь на работу Даунинга (Downing, 1968) предложили для описа-

* Фирменное название пластмассовых колец.

ния этой зависимости уравнение (13.88), а Даунинг и Ноулес (Downing and Knowles, 1967) — уравнение (13.89).

$$K_T = K_{20} \cdot 1,143^{(T-20)}; \quad (13.88)$$

$$K_T = 0,18e^{0,12(T-15)}, \quad (13.89)$$

где K_T — постоянная скорости нитрификации при температуре T ; K_{20} — постоянная скорости нитрификации при температуре 20 °C; T — температура, °C.

Хог и Маккарти (1971), проводившие эксперименты с погружным фильтром и синтетическими стоками, не содержащими органических веществ, вывели следующее уравнение, связывающее скорость нитрификации K и температуру (в °C):

$$K_T = 0,11 T - 0,2. \quad (13.90)$$

Уравнения (13.88) и (13.90) постулируют соответственно логарифмическое и линейное изменение константы нитрификации K_T в зависимости от температуры. Уравнение (13.90) было выведено при работе с синтетическими стоками, не содержащими органических примесей, тогда как уравнение (13.89) относится к стокам, содержащим как органические вещества, так и аммиак. В обеих системах содержание аммиака значительно превышало допустимое при выращивании лососевых. Так, в исследованиях Хога и Маккарти (1971) концентрация аммиака на входе в фильтр составляла в среднем около 10 мг $\text{NH}_3\text{—N/л}$. Поскольку Лиао и др. (1972) показали, что на работу нитрификационного фильтра большое влияние оказывает концентрация аммиака в поступающей воде, приведенные выше уравнения не могут быть непосредственно применены к фильтрам систем для разведения лососевых.

Лиао и др. (1972) использовали свои данные и температуру (1,67 °C), при которой согласно уравнению (13.90) постоянная $K_T=0$, для выведения уравнения (13.91). Таким образом, это уравнение выведено, по существу, на основании двух заданных точек (1,67 °C и 12 °C) с использованием результатов двух разных исследований, а также обнаруженной Хогом и Маккарти (1971) линейной зависимости между постоянной нитрификации K_T и температурой [см. уравнение (13.90)], что позволяет провести прямую линию между двумя заданными точками.

$$K_T = 0,097 T - 0,215. \quad (13.91)$$

Несмотря на принятые при выведении уравнения (13.91) допущения, оно, по-видимому, дает более правильную оценку константы — скорости нитрификации, чем уравнения (13.88) и (13.90), так как оно, по крайней мере частично, опирается на данные, полученные при рыбоводных работах и концентрации аммиака, имеющие практическое значение для рыбоводных систем. Однако при расчете постоянной скорости нитрификации для систем, в которых содержатся не лососевые, а другие рыбы, например, сомик-кошка, уравнение (13.90) может оказаться более пригодным. Кроме того, уравнение (13.90) было выведено на основе данных,

полученных при температурах от 5 до 25 °С, а уравнение (13.91) — 1,67 и 12 °С.

Выбранную зависимость (13.90) или (13.91) можно подставить в уравнение (13.87) для получения оценки эффективности окисления аммиака нитрифицирующими бактериями фильтра при разных значениях температуры и времени удерживания. Поскольку уравнение (13.87) было получено при работе с системами для выращивания лососевых, уравнение (13.91) использовано здесь для выведения уравнения (13.92). Прямая подстановка уравнения (13.87) в уравнение (13.91) дает коэффициенты, несколько отличающиеся от коэффициентов в уравнении (13.92). Уравнение (13.92) взято непосредственно из работы Лиао и др. (1972), и, по-видимому, разница в коэффициентах является результатом округления или различий в самих исходных данных, вводимых в уравнения.

$$E_T = (9,8T - 21,7)t_m, \quad (13.92)$$

где E_T — нитрификационная способность фильтра, %; t_m — время удерживания, ч; T — температура воды, °С.

Приведенные выше уравнения применимы, по-видимому, к расчету нитрифицирующих фильтров для лососевых, хотя выведены они были на основании работ главным образом с форелью. Эта методика расчета основана на данных, полученных многими исследователями, но расчетные уравнения выведены в основном Лиао и Майо. Примерно в это же время Спис (Среесе, 1973) разработал методику расчета нитрифицирующих фильтров для лососевых, особенно форели. Методика Списа опирается на графическое представление данных, что позволяет брать соответствующие значения с графиков.

Вторая методика расчета. На основании работ Хаскелла (Haskell, 1955, 1959), Пайпера (Piper, 1970) и Батербау и Уиллоуби (1967) Спис (1973) построил график, приведенный на рис. 13.59. Количество корма, необходимое для форели заводского выращивания, определяется по следующей формуле (Haskell, 1959):

$$= \frac{(\text{вес рыбы/количество корма в сутки}) \% = 3 (\text{кормовой коэффициент}) (\text{суточный прирост длины}) 100}{\text{длина рыбы}}, \quad (13.93)$$

где суточный прирост длины и длина рыбы должны быть выражены в одних и тех же единицах.

Батербау и Уиллоуби (1967) отмечают, что для конкретного вида рыбы при постоянной температуре воды и одинаковом корме числитель уравнения (13.93) является постоянной величиной. Они назвали эту постоянную «заводской константой» и переписали уравнение (13.93) следующим образом:

$$(\text{вес рыбы/количество корма в сутки}) \% = \frac{\text{заводская константа}}{\text{длина рыбы}}. \quad (13.94)$$

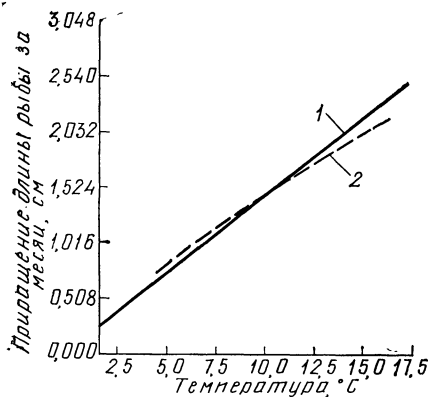


Рис. 13.59. Рост форели в зависимости от температуры, рассчитанной по данным Хаскелла (1) и Пайпера (2) (Speese, 1973)

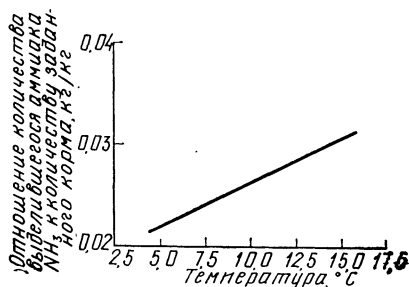


Рис. 13.60. Количество аммиака, выделяемого форелью на единицу заданного корма, в зависимости от температуры (Speese, 1973)

Хаскелл (1959) разработал теорию «температурной единицы», согласно которой для одного вида рыбы можно предсказать темп роста при любой температуре в диапазоне от 3,6 до 15,5 °C. Число температурных единиц — это среднемесячная температура воды минус 3,67 °C. Хаскелл вывел зависимость, которая показывает, что рост форели линейно связан с температурными единицами в диапазоне от 3,6 до 15,5 °C. В соответствии с этой зависимостью рост равен нулю при 3,6 °C. Батербау и Уиллоуби (1967) расширили эту концепцию, связав заводскую константу с температурой воды. Слис (1973) указывает, что Боуэн пересмотрел систему «температурных единиц» Хаскелла и в качестве единицы отсчета принял 0 °C вместо 3,6 °C. Приняв этот новый уровень отсчета и темп роста, равный 1,52 см в месяц при 10 °C, Слис (1973) нанес результаты Хаскелла на график (см. рис. 13.59). Если темп роста лососевых при температуре 10 °C известен, то можно определить темп их роста при любой температуре от 4,4 до 15,5 °C (Speese, 1973). При температуре выше 10 °C темп роста будет увеличиваться на 7,2 %, а при температуре ниже 10 °C — снижаться на 9 % на каждый градус. Данные Берроу (Burrough, 1968) по сеголеткам чавычи соответствуют модели Пайпера (см. рис. 13.59) в диапазоне 7,2 — 15,5 °C.

Слис (1973) вывел зависимость между выделением аммиака на фунт корма и температурой (рис. 13.60). Эта зависимость была получена на основе данных Рыбоводного центра Бозмена (США) (Bozeman Fish Cultural Development Center, 1970), где было выведено следующее уравнение для определения аммиачного коэффициента:

$$\text{коэффициент} = 0,139 \frac{(N_A)(Q)}{F}, \quad (13.95)$$

где N_A — концентрация аммиака, мг $\text{NH}_3\text{—N/л}$; Q — проточность, л/с; r — норма кормления, кг.

Используя аммиачный коэффициент, данные, имеющиеся по температурам 9,4 и 16,7 °C, и уравнение (13.95), Слис (1973) построил график, показанный на рис. 13.60. Он вычислил, что при температуре 9,4 °C выделяется 0,026 кг $\text{NH}_3\text{—N}$, а при температуре 16,7 °C — 0,032 $\text{NH}_3\text{—N}$ на 1 кг корма. Взяв эти две точки и предположив линейную зависимость, Слис (1973) построил график, показанный на рис. 13.60. По данным Рыбоводного центра Бозмена (1970), количество аммиака, выделяющегося на 1 кг корма, остается приблизительно постоянным при изменениях концентрации белка в корме в пределах 5 %. Эти данные также показывают, что содержание аммиака в воде прямо пропорционально количеству заданного корма и проточности воды, но не объему или частоте смены воды в выростном канале.

Слис (1973) также установил зависимость между скоростью нитрификации в фильтре и температурой. Хог и Маккарти (1970) вывели уравнение, связывающее скорость нитрификации в погружном фильтре и температуру. В их экспериментах концентрация аммиака в поступающей в фильтр воде составляла приблизительно 10 мг/л, т. е. значительно превышала допустимую в системах для разведения лососевых:

$$\frac{dC_A}{dt} = (0,11 T - 0,2) \left(\frac{C_A}{10} \right)^{1,2}, \quad (13.96)$$

где dC_A/dt — изменение концентрации аммиака C_A со временем в погружном фильтре, мг/л; T — температура, °C.

Работая с гравийным фильтром (диаметр гравия 1,9 см), Гиггер и Слис (Gigger and Spece, 1970) обнаружили, что при концентрации аммиака на входе около 0,5 мг $\text{NH}_3\text{—N/л}$ скорость нитрификации при 20 °C составляла 0,001 кг $\text{NH}_3\text{—N/(м}^2\cdot\text{сут)}$. Взяв это значение и уравнение (13.90), Слис построил график зависимости нитрифицирующей способности единицы площади поверхности фильтра от температуры (рис. 13.61). Если для построения этого графика взять уравнение (13.91), наклон будет несколько больше, хотя разница пренебрежимо мала.

Остальные расчетные графики Списа основаны на предположениях, принятых при построении графика, показанного на рис. 13.59: темп роста рыбы равен 1,5 см в месяц при температуре 10 °C, кормовой коэффициент равен 1,5. Если эти значения не подходят для какого-либо конкретного случая, их можно изменить при условии внесения соответствующих изменений во все графики.

Слис (1973) построил график, показанный на рис. 13.62, вычислив заводские константы для каждой температуры и нанося их на вертикальную и горизонтальную оси графика с помощью методики Пайпера (в изложении Списа). Соединив прямой линией соответствующие точки на этом графике, построенном в логарифмическом масштабе, он получил норму кормления для рыбы любой длины при любой температуре в диапазоне 5—15 °C.

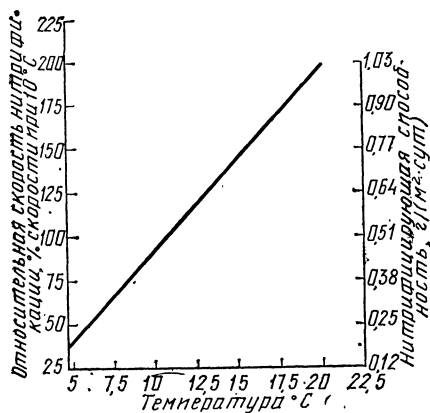


Рис. 13.61. Зависимость нитрифицирующей способности фильтра от температуры (Среезе, 1973)

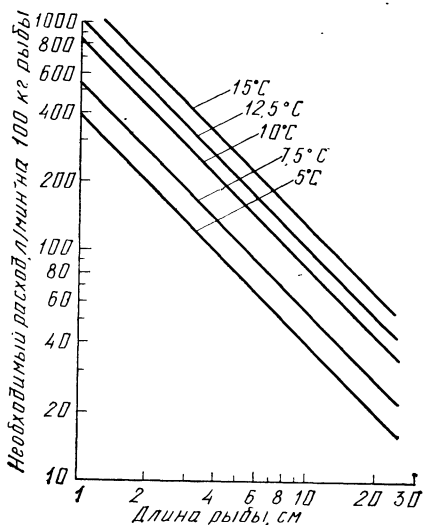


Рис. 13.62. Потребности форели в корме в зависимости от длины рыбы и температуры (Среезе, 1973)

График, показанный на рис. 13.63, был построен с использованием данных графиков, приведенных на рис. 13.60 и 13.62. Значения для этого графика были рассчитаны по уравнению (13.97).

$$\text{Скорость выделения аммиака} = (\text{норма кормления}) \times \\ \times (\text{скорость преобразования аммиака}). \quad (13.97)$$

Интенсивность кормления для рыбы заданной длины при определенной температуре была взята с графика на рис. 13.62, а скорость окисления аммиака при соответствующей температуре — с графика на рис. 13.60. Пересчет длины на вес выполнен по графикам Батербау и Уиллоуби (1967).

Затем были рассмотрены требования к качеству воды. Методика Списа требует знания желаемой или допустимой максимальной концентрации аммиака в воде, выходящей из фильтра. Для приведенных здесь графиков эта величина была принята равной 0,5 мг/л. Используя эту величину, можно рассчитать необходимую проточность:

$$Q/W = \frac{W_A/W}{E_q}, \quad (13.98)$$

где Q/W — проточность на единицу массы рыбы; W_A/W — количество аммиака, выделяемого на единицу массы рыбы; E_q — желаемая концентрация аммиака в воде.

Например, проточность (в л/с), необходимую для содержания 100 кг форели длиной 10 см при 10 °С, можно вычислить следую-

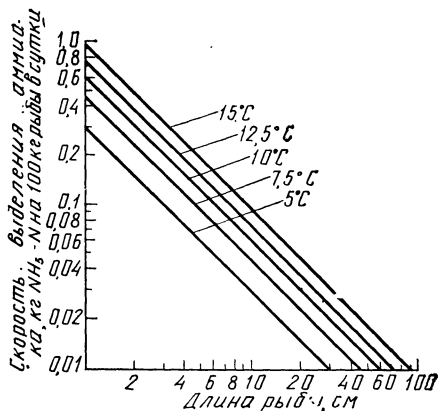


Рис. 13.63. Выделение аммиака форелью в зависимости от ее длины и температуры (Среее, 1973)

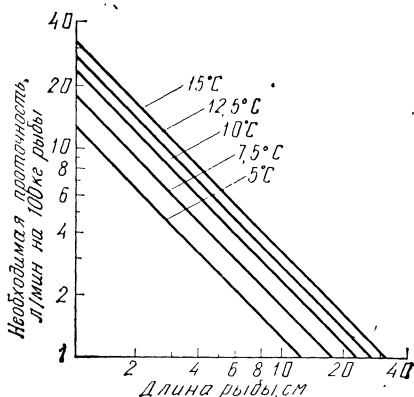


Рис. 13.64. Проточность, необходимая для поддержания концентрации аммиака, равной 0,5 мг/л, в зависимости от длины форели и температуры воды (Среее, 1973)

щим образом. Возьмем количество выделяемого аммиака с графика на рис. 13.63 и подставим его в уравнение (13.98):

$$\frac{Q}{100 \text{ кг форели длиной } 10 \text{ см}} = \frac{0,06 \text{ кг NH}_3 - \text{N}/100 \text{ кг рыбы в сутки}}{(0,5 \text{ мг/л}) (10^{-6}) (86400 \text{ с/сут}) 1 \text{ кг/л}}; \quad (13.99)$$

$$Q = 1,39 \text{ л/с на } 100 \text{ кг форели длиной } 10 \text{ см.}$$

Проточность, необходимая для содержания 100 кг рыбы при концентрации аммиака 0,5 мг/л, в зависимости от длины рыбы и температуры показана на рис. 13.64. Можно построить также график зависимости плотности посадки рыбы от ее длины. На графике с логарифмической сеткой такая зависимость представляла бы собой семейство прямых линий с отрицательными наклонами, причем прямая для 15 °C располагалась бы сверху, а для 5 °C — внизу.

Для обеспечения высокого качества продукции помимо токсичности аммиака необходимо также учитывать потребности в кислороде. Уиллоуби (Willoughby, 1968) показал, что для усвоения форелью 1 кг гранулированного корма требуется 0,22 кг кислорода. Кроме того, это отношение должно оставаться постоянным в температурном диапазоне от 4,4 до 15,5 °C. Спис (1973) использовал эти данные для выведения зависимости между потребностями в кислороде (в кг O_2) и количеством задаваемого корма:

$$\text{потребность в кислороде/100 кг рыбы} = (0,22) (\text{кг корма}). \quad (13.100)$$

На рис. 13.65 показана потребность в кислороде для рыб разной длины при нескольких значениях температуры.

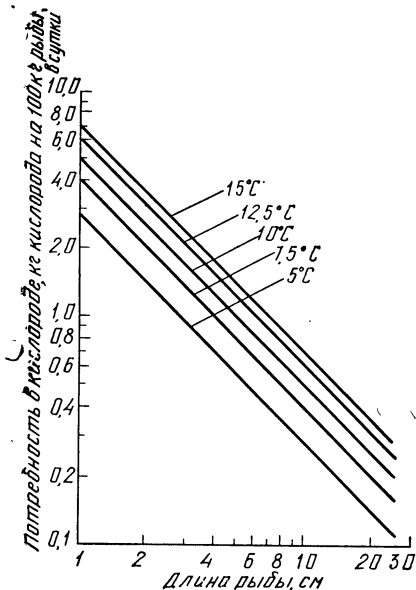


Рис. 13.65. Потребности форели в кислороде на обмен в зависимости от длины рыбы и температуры (Speese, 1973)

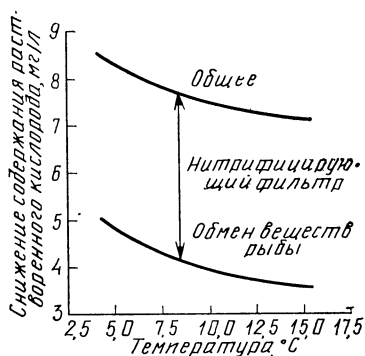


Рис. 13.66. Снижение содержания растворенного кислорода в воде в результате протекания обменных процессов и работы нитрифицирующего фильтра в зависимости от температуры (Speese, 1973).

Определив потребности в кислороде и проточность, можно рассчитать снижение содержания кислорода в результате протекания процессов обмена:

$$\Delta DO = 11,57 (Q_c/Q), \quad (13.101)$$

где ΔDO — изменение концентрации растворенного кислорода, мг/л; Q_c — потребление кислорода, кг на 100 кг рыбы в сутки; Q — проточность, л/с на 100 кг рыбы.

На рис. 13.66 уравнение (13.101) представлено в виде графика для проточности 1,18 л/с на 100 кг рыбы и потребления кислорода 0,4 кг O_2 на 100 кг рыбы в сутки. Нижняя кривая — это потребляемый рыбой кислород, вычисленный по уравнению (13.101). Снижение содержания кислорода при любой температуре постоянно независимо от длины рыбы. Кроме того, снижение содержания кислорода ускоряется при более низких температурах, так как при этом на единицу корма выделяется меньше аммиака. Это снижает требуемый расход воды для удаления аммиака, но потребность в кислороде почти не изменяется.

Уравнение (13.101) позволяет вычислить потребление кислорода рыбой, но не учитывает утилизации кислорода бактериями

фильтра. Гиггер и Спис (1970) утверждают, что кислородные потребности фильтра составляют примерно 150 % стехиометрических потребностей кислорода на нитрификацию. Поскольку для окисления 1 мг $\text{NH}_3\text{—N}$ /л стехиометрически необходимо 4,5 мг/л кислорода, то кислородные потребности нитрифицирующего фильтра составят:

$$DO_f = (1,5) [4,5 \text{ мг } \text{O}_2/\text{л} (\text{мг } \text{NH}_3\text{—N}/\text{л}) (0,5 \text{ мг } \text{NH}_3\text{—N}/\text{л})]; (13.102)$$

$$DO_f = 3,4 \text{ мг/л},$$

где DO_f — потребности нитрифицирующего фильтра в растворенном кислороде; 0,5 мг $\text{NH}_3\text{—N}/\text{л}$ — максимально допустимая концентрация $\text{NH}_3\text{—N}$ в системе.

Таким образом, общая потребность в кислороде складывается из потребностей фильтра и потребностей рыбы (см. рис. 13.66). Необходимо отметить, что Спис (1973) принял кислородную потребность фильтра в диапазоне температур 5—15°C постоянной, поскольку концентрация аммиака в поступающей на фильтр воде поддерживается неизменной путем регулирования плотности посадки в зависимости от температуры. Правомерность этого допущения требует подтверждения.

Суточное выделение аммиака в зависимости от длины рыбы и температуры можно получить с графика рис. 13.63, а скорость окисления аммиака погружным нитрифицирующим фильтром — с графика рис. 13.61. По этим данным с помощью уравнения (13.103) можно вычислить удельную площадь поверхности фильтра, необходимую для обеспечения требуемой скорости нитрификации. Удельная площадь поверхности фильтра — это площадь субстрата (гравий или пластмассовые кольца), доступная для развития бактерий.

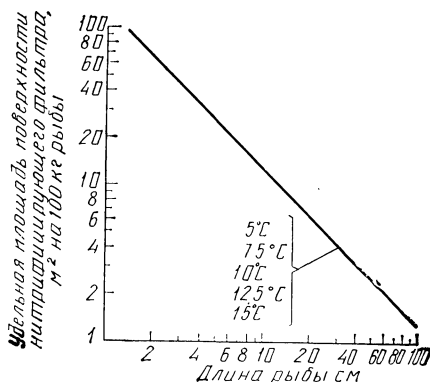
$$SSA = \frac{\text{скорость образования } \text{NH}_3\text{—N} (\text{кг } \text{NH}_3\text{—N}/100 \text{ кг рыбы в сутки})}{\text{скорость нитрификации} (\text{кг } \text{NH}_3\text{—N}/\text{м}^2 \text{ в сутки})}, \quad (13.103)$$

где SSA — удельная площадь поверхности фильтра, м^2 на 100 кг рыбы.

На рис. 13.67 показан график зависимости удельной площади поверхности фильтра от длины рыбы и температуры. Спис (1973) указывает, что в диапазоне температур от 5 до 15°C необходимая удельная площадь поверхности не зависит от температуры. Он объясняет это тем, что как выделение аммиака, так и интенсивность кормления меняются в зависимости от температуры, и изменения скорости нитрификации совпадают с этими изменениями.

Спис (1973) вывел также зависимость между удельной площадью поверхности на единицу объема загрузки фильтра (гравий) и размером частиц гравия (рис. 13.68). Для одного типа загрузки эта зависимость может быть правильной, а для другого — нет, например для пластмассовых колец она не годится,

Рис. 13.67. Удельная площадь поверхности нитрифицирующего фильтра в зависимости от длины форели и температуры, необходимая для поддержания концентрации аммиака ниже 0,5 мг/л (Speese, 1973)



поэтому такой график необходимо строить для каждого конкретного случая.

Спис (1973) объединил приведенные выше графики в два расчетных графика (рис. 13.69 и 13.70). На рис. 13.69 показан один такой график для расчета количества продуктов обмена, т. е. нагрузки на фильтры и необходимой проточности. Заводскую константу определяют для конкретного рыбоводного завода и откладывают по вертикальной и горизонтальной осям графика, затем обе точки соединяют прямой линией.

Методика расчета с помощью графика, показанного на рис. 13.69, заключается в следующем. На горизонтальной оси выбирают длину рыбы и из этой точки восстанавливают перпендикуляр до пересечения с линией заводской константы. От точки пересечения проводят горизонтальную линию влево и вправо. Справа получают значение БПК или количество образующихся взвешенных

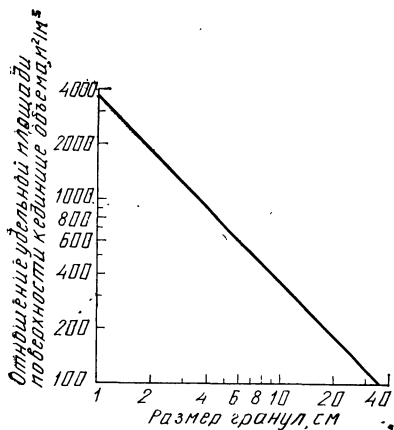


Рис. 13.68. Удельная площадь поверхности на единицу объема фильтрующей среды в зависимости от размера гранул (Speese, 1973)

веществ. Слева считывают интенсивность кормления и продолжают горизонтальную линию до пересечения с линией необходимой температуры. От точки пересечения с этой линией проводят линию вертикально вниз и получают количество выделяемого аммиака. Вертикальную линию продолжают вниз до пересечения с наклонной линией. От точки пересечения проводят горизонтальную линию вправо и получают необходимую проточность.

С помощью графика на рис. 13.70 можно рассчитать необходимую удельную площадь поверхности нитрифицирующего фильтра (с учетом 10 условий, перечисленных ниже). Из точки,

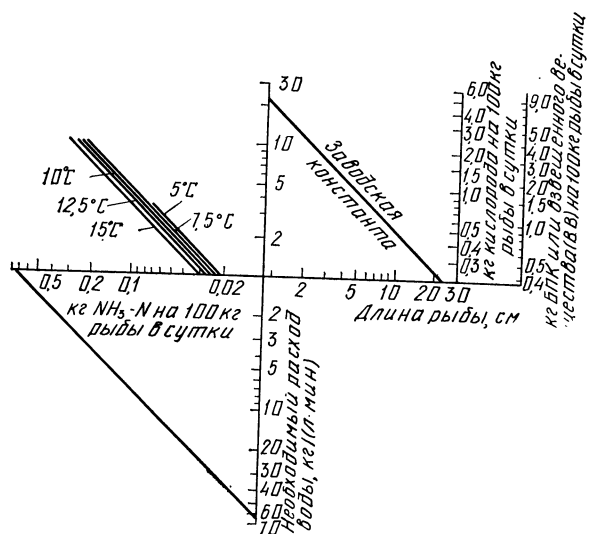


Рис. 13.69. Выделение продуктов обмена, расход воды и потребности форели в кислороде в зависимости от длины рыбы и температуры (Speese, 1973)

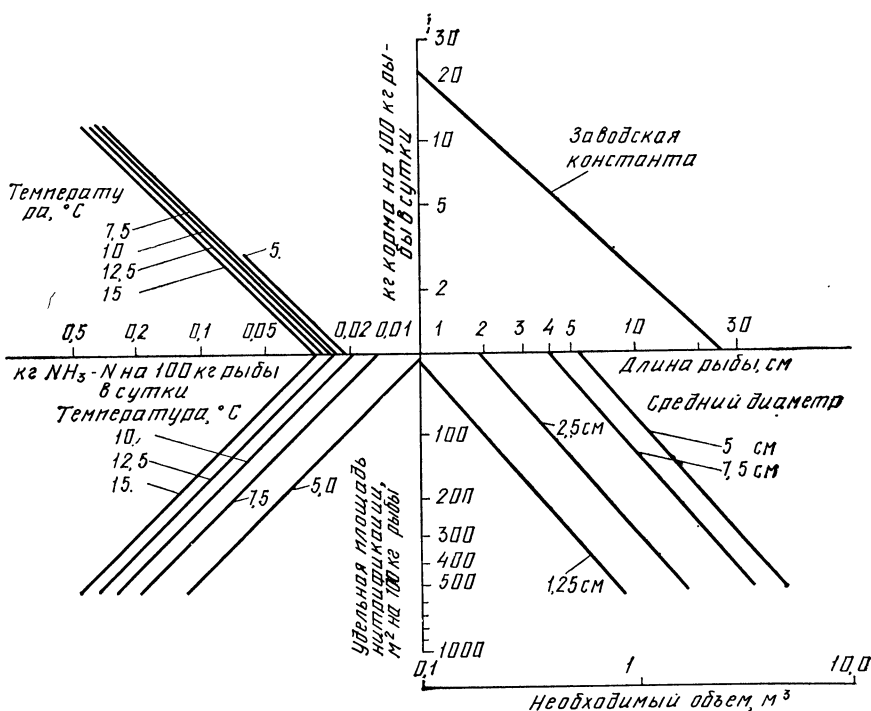


Рис. 13.70. График для расчета нитрифицирующего фильтра с использованием установленной заводской константы и с учетом допущений, указанных в тексте (Speese, 1973)

соответствующей длине рыбы, восстанавливают перпендикуляр до пересечения с линией заводской константы. От точки пересечения проводят горизонтальную линию до пересечения с линией температуры. От этой точки проводят вертикальную линию до тех пор, пока она снова не пересечет линию температуры. Затем проводят горизонтальную линию и получают значение необходимой удельной площади поверхности. Горизонтальную линию продолжают до пересечения с линией среднего диаметра частиц гравия. Вертикальная проекция этой точки вниз дает значение необходимой загрузки фильтра.

Графики, показанные на рис. 13.69 и 13.70, применимы только к системам, отвечающим условиям, указанным выше при обсуждении графиков. К основным условиям относятся следующие: температура 4,4—15,6 °C; темп роста 1,52 см в месяц при температуре 10 °C; количество кислорода, необходимое для утилизации 1 кг корма, равно 0,22 кг; количество выделяющегося аммиака связано линейной зависимостью с температурой; уравнение Хога и Маккарти (1971), связывающее константу нитрификации с температурой, справедливо для фильтров рыбоводных систем; кормовой коэффициент равен 1,5:1, предельно допустимая концентрация аммиака на выходе системы составляет 0,5 кг $\text{NH}_3\text{—N/л}$; система предназначена для выращивания форели, хотя графики можно применять и для других лососевых; удельная площадь поверхности среды фильтра связана указанной выше зависимостью с объемом и диаметром частиц; заводская константа соответствует указанной на графике.

Нарушение этих исходных условий делает графики, приведенные на рис. 13.69 и 13.70, полностью или частично непригодными. Некоторые отклонения можно скорректировать путем внесения поправок в соответствии с конкретными условиями, другие (например, вид рыбы) делают весь график ненадежным или недействительным.

До сих пор БПК и содержание взвешенных веществ (ВВ) в расчетах не учитывалось, хотя и Спис (1973), и Лиао и др. (1972) принимали эти два параметра во внимание. Спис (1973) обнаружил, что на 1 кг сухих фекалий рыбы, находящихся во взвешенном состоянии, расходуется примерно 1 кг кислорода. Эксперименты (Спеее, 1973) показали, что при скармливании 1 кг форелевого корма сомику-кошке и полной его утилизации вырабатывалось 0,4 кг сухих фекалий. Таким образом, на 1 кг корма БПК оказалось равным 0,4 кг. Спис считает, что это достаточно хорошо согласуется с данными Лиао (Liao, 1970).

Используя это соотношение (т. е. количество фекалий — количество утилизированного корма) и исходя из предположения, что оно не зависит от длины рыбы и температуры, Спис (1973) построил график зависимости БПК и содержания ВВ от длины рыбы и температуры (рис. 13.71; см. также рис. 13.69). Выявлена также зависимость БПК и ВВ от интенсивности кормления, которая обсуждалась выше.

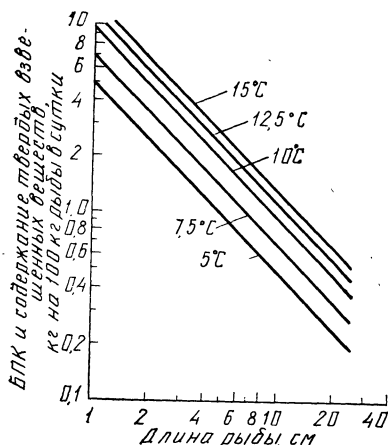


Рис. 13.71. Увеличение БПК и содержания твердого взвешенного вещества вследствие обмена веществ в зависимости от длины рыбы и температуры (Speece, 1973)

Лиао и др. (1972) вывели уравнения зависимости между содержанием ВВ, БПК, ХПК и интенсивностью кормления [уравнения (13.69), (13.70) и (13.71) соответственно]. В соответствии с их данными увеличение содержания органических веществ в воде снижает скорость нитрификации в фильтрах. К такому же выводу пришли Гиггер и Слис (1970), Мид (1974) и Дадлз и Ричардсон (Duddles and Richardson, 1973). Ломакс (Lomax, 1976) провел опыты по изучению влияния содержания органических веществ на скорость нитрификации в фильтрах замкнутых систем для выращивания сомика. Ему не удалось выявить статистически достоверной зависимости при общем содержании взвешенных веществ в диапазоне от 436 до 898 мг/л.

Последовательность расчета. Методика Списа заключается главным образом в правильном построении графиков и считывании с них соответствующих данных. Эта методика достаточно подробно обсуждалась выше и не требует дополнительных разъяснений.

Методика Лиао и Майо несколько сложнее, и ниже приводится последовательность расчета по этой методике.

1. Вычисляют необходимую проточность:

а) определяют пропускную способность либо по уравнениям (13.72) — (13.74), либо с помощью методики Пайпера [уравнение (13.75)];

б) определяют общий расход воды Q делением общего количества рыбы W на пропускную способность L_e .

2. Определяют общую концентрацию аммиака W_A .

Метод 1-й:

а) определяют скорость выделения аммиака N_A по уравнению (13.77);

б) умножают общее количество рыбы W на скорость выделения аммиака N_A для определения общего количества выделяющегося аммиака W_A .

Метод 2-й:

а) определяют интенсивность кормления и вычисляют количество выделяющегося аммиака N_A по уравнению (13.66);

б) то же, что в пункте (б) метода 1-го.

3. Вычисляют показатель концентрации аммиака C :

а) определяют исходную концентрацию аммиака C_i по уравнению

$$C_i = \frac{K_4 W_A}{Q},$$

где K_4 — константа, зависящая от размерности величин (например, $K_4=702,4$, если W_A выражено в кг/сут, Q в л/мин и C_i в мг/л);

б) выбирают допустимую концентрацию аммиака C_2 из табл. 13.7;

Таблица 13.7. Допустимая максимальная четырехчасовая концентрация аммиака (в мг/л) в воде при выращивании лососевых* (Liao et al., 1972)

Концентрация аммиака $NH_4 - N$	Мелкая рыба (длина 7,6 см)	Крупная рыба (длина 15 см)
Оптимальная	0,3	0,5
Приемлемая	0,5	0,75
Максимальная**	1,0	1,5
Допустимая ионизированного аммиака	0,005	0,0075

* Приведенные в таблице значения — это пиковые четырехчасовые значения. Для получения суточных допустимых средних значений, приведенные в таблице значения следует умножить на 0,86.

** Только для непродолжительного экспонирования; продолжительное выдерживание при максимальной концентрации неблагоприятно отразится на рыбе.

в) вычисляют показатель концентрации аммиака:

$$C = C_2/C_i. \quad (13.104)$$

4. Вычисляют требуемую эффективность окисления аммиака фильтром:

а) определяют необходимое количество (в %) рециркулируемой воды R путем сопоставления необходимого общего расхода (см. пункт 1) с имеющимся количеством воды или назначают количество рециркулируемой воды.

б) вычисляют эффективность фильтра* путем перегруппировки уравнения (13.76) следующим образом:

$$E = \frac{1 + CR - C}{CR}.$$

5. Вычисляют общую аммиачную нагрузку на фильтр W_{AF} .

$$W_{AF} = (W_A)C. \quad (13.105)$$

При рециркуляции воды суммарная аммиачная нагрузка на фильтр увеличивается по сравнению с первоначальной концентра-

* Лиао и др. (1972) обнаружили, что если необходимая эффективность фильтра не превышает 20 %, достаточно эффективным оказывается отстойник с временем удерживания 1 ч.

цией (т. е. с концентрацией аммиака на выходе аналогичной системы с однократным использованием воды).

б) Вычисляют необходимую загрузку фильтра:

а) определяют необходимое время удерживания загрузкой фильтра с помощью уравнения (13.92), перегруппированного следующим образом:

$$t_m = \frac{E_f}{9,8T - 21,7};$$

б) выбирают материал загрузки фильтра и определяют удельную площадь поверхности на единицу объема A и размер пор ϵ . Ломакс (1976) разработал метод определения удельной площади поверхности гравия;

в) корректируют время удерживания фильтром с учетом снижения времени удерживания твердыми частицами загрузки по следующему уравнению:

$$t_{m1} = t_m/\epsilon; \quad (13.106)$$

г) вычисляют необходимый объем загрузки фильтра.

$$V_m = (Q)(t_{m1}), \quad (13.107)$$

где Q — общий расход воды;

д) определяют общую удельную площадь поверхности среды.

$$A_{sp} = (V_m)(A_u); \quad (13.108)$$

е) проверяют не превышает ли интенсивность аммиачной загрузки $9,77 \cdot 10^{-5}$ кг $\text{NH}_4\text{—N}/(\text{м}^2 \cdot \text{сут})$.

7. Вычисляют параметры фильтра:

а) выбирают или определяют желательную гидравлическую нагрузку H_L ;

б) вычисляют площадь поперечного сечения фильтра.

$$A_f = Q/H_L; \quad (13.109)$$

в) определяют объем фильтра V_f с помощью уравнений (13.110) и (13.111).

$$t_f = 1,6t_{m1}, \quad (13.110)$$

где t_f — время удерживания фильтром; t_{m1} — время удерживания загрузкой фильтра.

Постоянная 1,6 в уравнении (13.110) получена как отношение объема фильтровального бассейна, использованного в экспериментах Рыбоводного центра Бозмена к объему фильтрующей загрузки. Эта величина зависит от фильтра.

$$V_f = Qt_f; \quad (13.111)$$

г) вычисляют глубину фильтра D_f и глубину загрузки фильтрующего слоя D_m .

$$D_f = V_f/A_f; \quad (13.112)$$

$$D_m = V_m/A_f. \quad (13.113)$$

Глубина фильтрующего слоя должна быть не менее 1 м для предотвращения возникновения застойных зон и частичной закупорки фильтра органическими веществами и отмершими бактериями. Частичная закупорка фильтра увеличивает также возможность образования в фильтре анаэробных участков и, следовательно, метана и сероводорода. Берроуз и Комбз (1968) и Лиао и др. (1972) рекомендуют минимальную глубину фильтра не менее 1,22 м.

Объем фильтрующего слоя также важен при расчете. Если используется гравий, то чем меньше диаметр частиц, тем больше удельная площадь поверхности на единицу объема. Следовательно, мелкий гравий обеспечивает необходимую удельную площадь поверхности при меньшем размере фильтра. Однако чем мельче гравий, тем быстрее взвешенные частицы и отмершие бактерии засоряют фильтр и тем чаще возникает необходимость обратной промывки фильтра. Засорение ведет к чрезмерной потере напора, уменьшению расхода и увеличению риска образования в фильтре анаэробных участков. С обратной промывкой удаляется большое количество нитрифицирующих бактерий и снижается производительность фильтра. Итак, мелкие частицы обеспечивают увеличение площади поверхности на единицу объема, но при этом возникает проблема засорения. Диаметр частиц гравия следует выбирать с учетом желательности устранения или сведения к минимуму необходимости обратной промывки. Наполнитель фильтра из пластмассы диаметром 2,5—7,5 см, по-видимому, удовлетворяет требованиям в отношении засорения и в то же время обеспечивает достаточную площадь поверхности на единицу объема. Гравий должен быть размером не менее 2 см, а желательно и крупнее, чтобы предотвратить засорение. Спотт (Spotte, 1970) рекомендует использовать в качестве фильтрующей среды гравий диаметром 2—4 мм. Хотя такой диаметр частиц слишком мал для промышленных систем из-за высокого содержания в них органических веществ, он может быть подходящим для небольших аквариумов, где вода должна быть прозрачной.

Третья методика расчета. Слис (1973) и Лиао и др. (1972) разработали собственные методики расчета для пресноводных лососевых хозяйств и диапазона температур 15—16 °C. Расчету нитрифицирующих фильтров для систем до сих пор не уделялось внимания. Однако Хираяма (Hirayama, 1966) вывел уравнение для пропускной способности небольших морских систем:

$$\sum_{i=1}^p \left[\frac{10A_f}{0,70/v_i + (0,95 \cdot 10^3)/(G_i D_i)} \right] > \sum_{j=1}^q (B_j^{0,544} \cdot 10^{-2}) + 0,051F, \quad (13.114)$$

где A_f — площадь поверхности фильтрующего слоя, м²; v — скорость фильтрования, см/мин; D — глубина фильтра, см; p — число фильтров, обслуживающих систему; G — коэффициент размера частиц гравия [см. уравнение (13.115)]; B —

вес одной рыбы, г; F — количество задаваемого в сутки корма, г; q — число рыб в системе.

Коэффициент размера частиц гравия

$$G = \frac{X_1}{R_1} + \frac{X_2}{R_2} + \frac{X_3}{R_3} + \dots + \frac{X_n}{R_n}, \quad (13.115)$$

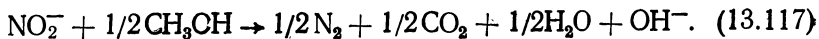
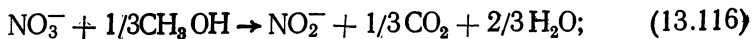
где R — средний размер частиц каждой фракции гравия в фильтрующем слое, мм; X — вес каждой размерной фракции, %.

Левая часть уравнения (13.114) — это окислительная способность фильтра или фильтров системы, а правая — скорость образования продуктов обмена в системе. Следует отметить, что скорость фильтрования включает время удерживания, так как принимается, что объем пустот фильтра постоянен, тогда как коэффициент размера частиц учитывает изменение удельной площади поверхности фильтра на единицу объема с изменением размера частиц фильтрующей среды. Кроме того, система может вынести нагрузку с большим общим весом крупных рыб, чем мелких. Это согласуется с наблюдениями Списа (1973) и Лиао и Майо (1974), которые отмечают, что более крупные рыбы потребляют меньше корма на единицу веса и выделяют меньше продуктов обмена на единицу веса, чем мелкие.

ДЕНИТРИФИЦИРУЮЩИЕ ФИЛЬТРЫ

Нитрифицирующие фильтры превращают аммиак в нитриты и затем в нитраты. Если нитраты не удалять путем добавления воды или другим способом, они будут постепенно накапливаться в системе. Хотя нитраты относительно нетоксичны, при высоких концентрациях они могут стать токсичными для рыбы. Уэстин (Westin, 1973) обнаружил, что LD_{50} нитратов составляет для чавычи в пресной воде 5000 мг/л, а в соленой — 4000 мг/л. Концентрации нитратов, вызывающие снижение интенсивности питания и задержку роста, неизвестны.

Одним из способов удаления нитратов и нитритов из воды является денитрификация. Мид (1974) показал, что денитрификация снижала содержание NO_3-N на 85—90 % и NO_2-N на 60—84 % в воде, выходящей из замкнутой системы для разведения чавычи. Денитрификация — двухступенчатый процесс, в котором в качестве источника углерода используется метанол:



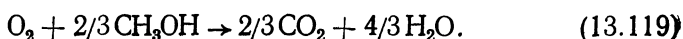
Суммарная реакция (St. Amant and McCarty, 1969)



Следовательно, для полного превращения 1 мг/л NO_3-N в N_2 требуется 1,90 мг метанола на 1 л. Отсутствие достаточного

количества метанола для полной денитрификации $\text{NO}_3\text{—N}$ увеличивает содержание $\text{NO}_2\text{—N}$ на выходе. Поскольку $\text{NO}_2\text{—N}$ более токсичные, чем $\text{NO}_3\text{—N}$, важно, чтобы выбранный источник углерода (органическое вещество) присутствовал в количестве, достаточном для завершения денитрификации.

Хотя некоторые исследователи (Smith et al., 1972) показали, что денитрификация может идти при концентрациях кислорода до 1 мг/л, она интенсивнее протекает в анаэробных условиях. Следовательно, до начала нитрификации кислород следует удалить. Это можно сделать путем добавления избыточного количества метанола или другого органического вещества с высоким потреблением кислорода. Реакция в системах с использованием метанола в качестве органического вещества (St. Amant and McCarty, 1969) имеет следующий вид:



Следовательно, для удаления из отработанной воды 1 мг/л кислорода необходимо 0,67 мг/л метанола.

Для роста бактерий требуется органическое вещество. Эти потребности могут также удовлетворяться за счет метанола или аналогичного соединения. Потребность в органическом веществе можно оценить с помощью коэффициента потребления, определяемого как отношение общего количества химического вещества, необходимого для денитрификации, к стехиометрической потребности на денитрификацию и обескислороживание. Маккарти и др. (1969) определили, что для метанола коэффициент потребления составляет 1,3. Следовательно, для обеспечения роста бактерий необходимо внести дополнительно 30 % метанола.

Используя эти данные, Сент-Амант и Маккарти (1969) вывели следующее уравнение, позволяющее вычислить количество метанола, которое необходимо добавить к отработанной воде для завершения денитрификации:

$$C_m = 2,47 N_3 + 1,53 N_2 + 0,87 D_0, \quad (13.120)$$

где C_m — необходимая концентрация метанола, мг/л; N_3 — концентрация $\text{NO}_3\text{—N}$ на входе в фильтр, мг/л; N_2 — концентрация $\text{NO}_2\text{—N}$ на входе в фильтр, мг/л; D_0 — содержание растворенного кислорода на входе в фильтр, мг/л.

Уравнение (12.120) учитывает 30 % метанола, необходимого для роста бактериальных клеток.

Денитрификация осуществляется различными бактериями: факультативными, анаэробными, гетеротрофными (*Pseudomonas* sp., *Micrococcus* sp., *Denstrofacillus* sp., *Spirillum* sp. и *Achromobacter* sp.) (Dawson and Murphy, 1972). На скорость превращения нитратов в азот этими и другими денитрифицирующими бактериями влияют некоторые параметры окружающей среды. Необходимость органического вещества и анаэробных условий уже отмечалась выше. На скорость денитрификации бактериями оказывают влияние также содержание аммиака, pH и температура.

Делвич (Delwiche, 1956) показал, что *Pseudomonas aeruginosa* осуществляет денитрификацию в диапазоне значений pH от 5,8 до 9,2 при оптимальном значении pH от 7 до 8,2. Конечным продуктом денитрификации при pH выше 7,3 был элементарный азот (N_2), а при pH ниже 7,3 увеличивалось образование закиси азота. Соьер и др. (Sawyer et al., 1973) обнаружили, что значение pH, оптимальное для денитрификации городских стоков, находится в диапазоне 6,5—7,5. При значениях pH ниже 6,5 интенсивность денитрификации линейно уменьшалась и при pH 6,1 снижалась до 80 % максимальной. Аналогичная зависимость наблюдалась и при значениях pH выше 7,5, т. е. интенсивность денитрификации снижалась линейно и при pH 7,9 составила 80 % максимальной. Нельсон и др. (Nelson et al., 1973) показали, что при значениях pH от 5,5 до 8 интенсивность денитрификации в пробах речной воды не зависит от pH. Таким образом, интенсивность денитрификации, по-видимому, максимальная в диапазоне значений pH от 6,5 до 7,5, а во многих случаях этот диапазон можно расширить до значений pH 6—8.

Значительное влияние на интенсивность денитрификации оказывает также температура. Доусон и Мерфи (Dawson and Murphy, 1972), работавшие с культурами, в которых преобладали бактерии *Pseudomonas denitrificans*, развившиеся в определенной среде, показали, что зависимость интенсивности денитрификации от температуры в диапазоне от 3 до 27 °C описывается следующим уравнением:

$$K_d = 3,195 \cdot 10^{11} e^{-16.800/RT}, \quad (13.121)$$

где K_d — постоянная денитрификации; R — универсальная газовая постоянная, кал/(г·моль·К); T — абсолютная температура, К.

Используя уравнение (13.120) для определения потребностей в метаноле, Мид (1974) применил денитрифицирующий фильтр глубиной 3,65 м и диаметром 0,61 м в замкнутой системе для выращивания чавычи. В качестве загрузки использовались 2,54-сантиметровые пластмассовые кольца. При изменении расхода от 4 до 15 л/мин (время удерживания 4,45—1,18 ч соответственно) скорость денитрификации NO_3-N достигала 452,3 г/м³ в сутки, или 232 мг/1000 см² в сутки, при температуре 14 °C. Смит и др. (Smith et al., 1972), применявшие денитрификационный гравийный фильтр (диаметр 1,9 см) для очистки городских стоков, получили скорость денитрификации 356 мг NO_3-N /1000 см² в сутки. Эта более высокая скорость денитрификации была достигнута главным образом благодаря температуре, которая у Смита и др. составляла 27 °C по сравнению с 14 °C у Мида (1974). Мид (1974) считает, что его данные можно с уверенностью использовать для полногабаритной лососеводной системы.

Расчет денитрификационного фильтра требует определения скорости удаления нитратов и нитритов на единицу удельной площади поверхности фильтра в единицу времени. По-видимому, только данные Мида относятся к денитрификации в рыбоводных

системах. В его системе концентрация нитратов на входе в фильтр составляла 55,8—68,2 мг/л, а нитритов 0,23—0,45 мг/л. При времени удерживания и температурах, указанных выше, ему удалось добиться удаления 80—90 % нитратов и 60—85 % нитритов. Используя полученную Мидом (1974) величину 232 мг $\text{NO}_3\text{—N}/1000 \text{ см}^2$ в сутки и уравнение (13.122), можно рассчитать удельную площадь поверхности фильтра, необходимую для системы. Поправку на температуру можно получить с помощью уравнения (13.12). Хотя точность определения поправок на температуру с помощью уравнения (13.121) не доказана, при отсутствии более надежных данных можно использовать этот подход для получения хотя бы ориентировочной оценки.

$$A_{sp} = \frac{(N_3) Q (1440)}{0,232 \text{ мг}/(\text{см}^2 \cdot \text{сут})}, \quad (13.122)$$

где A_{sp} — удельная поверхность фильтрующей среды, см^2 ; N_3 — концентрация $\text{NO}_3\text{—N}$ на входе, мг/л; Q — расход воды, л/мин; 1440 — переводной коэффициент, мин/сут.

Используя A_{sp} и зная отношение удельной площади поверхности к объему для выбранной среды A_u , можно рассчитать объем фильтра

$$V_m = A_{sp}/A_u. \quad (13.123)$$

РАСТИТЕЛЬНЫЕ ФИЛЬТРЫ

Такие неорганические питательные вещества, как нитраты, нитриты, аммиак и фосфаты, можно вывести из культуральной среды путем включения их в клетки растений, которые затем удаляются. Для выведения питательных веществ с помощью растений применяют системы двух типов. В одних используют микроскопические растения, главным образом водоросли, для которых источником энергии служит солнечный свет или органическое вещество. Такие системы в сочетании с бактериями нашли широкое применение при очистке сточных вод. Хотя такая система и может обеспечить удаление питательных веществ, необходимо какое-то устройство для сбора водорослей.

В других системах для удаления питательных веществ используются более крупные водные растения: укореняющиеся, плавающие или растущие в погруженном состоянии. Многие из этих растений можно использовать в качестве корма для животных (Boyd, 1969), некоторые легко собирать (Boyd, 1970) и отделять от воды.

Независимо от вида используемого растения при расчете растительного фильтра необходимо учитывать несколько факторов. Первостепенное значение имеет скорость поглощения питательных веществ растениями, так как она будет определять необходимое время удерживания фильтром. Харвей и Фокс (Harvey and Fox, 1973), работавшие с ряской *Lemna minor* в фильтре системы вторичной очистки городских стоков, обнаружили линейную зависимость между содержанием суммарного азота (в %) по Кьельда-

лю и временем удерживания в сутках. Через двое суток было удалено 21 %, а через 10 сут — около 86 % азота. Однако удаление некоторой части азота могло происходить помимо Lemnа minog, так как в контрольных пробах содержание суммарного азота снизилось за 10 сут примерно на 30 %. Содержание суммарного фосфора также снижалось в зависимости от времени удерживания. Около 13 % фосфора было удалено при времени удерживания 2 сут, а через 8 сут было удалено около 45 %. Количество удаленного фосфора было связано линейной зависимостью с временем удерживания в диапазоне 2—8 сут, но в диапазоне времени удерживания от 8 до 10 сут концентрация фосфора несколько увеличилась (Harvey and Fox, 1973). В системе Харвея и Фокса температура составляла 24 °С, освещенность 11 клк, а продолжительность темной части суток — 12 ч. Голдману и др. (Goldman et al., 1974) удалось достичь 95 %-ного удаления азота в полужамкнутой системе с морскими водорослями, в которую подавалась морская вода и городские стоки вторичной очистки в отношении 4:1. Однако время удерживания установить трудно, хотя оно составляло, по-видимому, не менее 24 ч. Следовательно, для удовлетворительного удаления азота и фосфора из большинства систем время удерживания фильтром измеряется сутками, а не минутами. В рециркуляционных системах для культивирования водных организмов такое длительное время удерживания может быть неосуществимым или нерентабельным.

Эффективность удаления питательных веществ растительными фильтрами зависит от концентрации и баланса питательных веществ на входе в фильтр, освещенности, продолжительности светлого и темного периодов, вида растения и температуры воды. Данных об эффективности удаления питательных веществ из рыбоводных систем с помощью растений недостаточно для выведения расчетных уравнений или установления критериев.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящее время в рыбоводстве применяются в основном проточные системы, которые обеспечивают необходимое качество воды. По мере истощения запасов воды и ужесточения контроля за стоками значение фильтрации воды в рыбоводстве будет возрастать. Интерес к замкнутым системам также потребует эффективных фильтрационных систем.

Наиболее широкое применение в настоящее время находят биологические фильтры в основном для превращения аммиака в нитраты. Широко используются также угольные фильтры для удаления растворенных органических веществ. Для этой же цели все чаще применяют пенное фракционирование, особенно в системах с морской водой.

В настоящее время наиболее практичной системой очистки воды, по-видимому, является система, состоящая из отстойника для удаления крупных взвешенных частиц, установки для пенного

фракционирования, с помощью которой удаляются растворенные органические вещества, и, наконец, биологического фильтра. Удаление неорганических ионов при пенном фракционировании следует контролировать. Содержание нитратов обычно регулируют добавлением воды. Кроме того, в аквариумах и других устройствах, в которых требуется высокая прозрачность воды для визуальных наблюдений, часто применяют диатомовые фильтры.

REFERENCES

- Alciatore, A. F. and E. L. Neu (1971). Comparison of Filteraids. *Chemical Engineering Progress* 67 (12): 49—50.
- Anderson, Dennis (1974). A Biological Trickling Filter System for Water Reuse in Trout Rearing. Minnesota Department of Natural Resources, Fisheries Section, Investigational Report No. 322, St. Paul.
- Andrews, James W. (1972). Stocking Density and Water Requirements for High—Density Culture of Channel Catfish in Tanks or Raceways. *Feedstuffs* 44 (6): 40.
- Anon. (1971). Notes on Water Pollution, No. 52. Water Pollution Research Laboratory, Stevenage, England.
- Arden, T. V. (1968). *Water Purification by Ion Exchange*. Plenum Press, New York.
- Battelle Northwest (1969). Ammonia Removal from Agricultural Runoff and Secondary Effluents by Selective Ion Exchange. Robert A. Taft Water Research Center Report No. TWRC-5.
- Bauer, Robert C. and Vernon L. Snoeyink (1973). Reactions of Chloramines with Active Carbon. *Journal of the Water Pollution Control Federation* 45 (11): 2290—2301.
- Baumann, E. Robert (1965). Diatomite Filters for Municipal Use. *Journal of the American Water Works Association* 57 (2): 157—180.
- Baumann, E. Robert, John, L. Cleasby, and Robert L. LaFrenz (1962). A Theory of Diatomite Filtration. *Journal of the American Water Works Association* 54 (9): 1109—1119.
- Baumann, E. Robert and Charles S. Oulman (1964). Modified Form of Diatomite Filtration Equation. *Journal of the American Water Works Association* 56 (3): 330—332.
- Bell, George R. (1962). Design Criteria for Diatomite Filters. *Journal of the American Water Works Association* 54: 1241—1256.
- Boucher, Percival Lionel (1947). A New Measure of the Filtrability of Fluids with Applications to Water Engineering. *Journal of the Institute of Civil Engineering (Brit.)*, 27 (4): 415—446.
- Boyd, Claude E. (1969). The Nutritive Value of Three Species of Water Weeds. *Economic Botany* 22 (2): 123—127.
- Boyd, Claude E. (1970). Vascular Aquatic Plants for Mineral Nutrient Removal from Polluted Waters. *Economic Botany* 23 (1): 95—103.
- Bozeman (Montana) Fish Cultural Development Center 1970 Quarterly Report (March 1970). U.S. Bureau of Sport Fisheries and Wildlife.
- Bradley, D. (1965). *Hydrocyclone*. Pergamon Press, New York.
- Brunotts, V. A., R. T. Lynch, and G. R. Stone (1973). Granular Carbon Handles Concentrated Waste. *Chemical Engineering Progress*, 69 (8): 81—84.
- Burns, D. E., E. R. Baumann, and C. S. Oulman (1970). Particulate Removal of Coated Filter Media. *Journal of the American Water Works Association* 62: 121—126.
- Burrows, Roger E. (1964). Effects of Accumulated Excretory Products on Hatchery-Reared Salmonids. Research Report No. 66, U.S. Fish and Wildlife Service.
- Burrows, Roger E. and Bobby D. Combs (1968). Controlled Environments for Salmon Propagation. *Progressive Fish-Culturist* 30 (3): 123—136.

Buterbaugh, G. L., and H. Willoughby (1967). A Feeding Guide for Brook, Brown and Rainbow Trout. *Progressive Fish-Culturist* 29 (4): 210—215.

Chesness, Jerry L., Kenneth S. Obenauf, and Thomas K. Hill (1975a). Chemical Flocculation of Catfish Raceway Effluent. Paper No. 75—5541, American Society of Agricultural Engineers, presented December 18, 1975, Chicago.

Chesness, Jerry L., William H. Poole, and Thomas K. Hill (1975b). Settling Basin Design for Raceway Fish Production Systems. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers* 18 (1): 159—162.

Cookson, John Thomas, Jr. (1967). Adsorption of Viruses on Activated Carbon-Adsorption of *Escherichia coli* Bacteriophage T₄ on Activated Carbon as a Diffusion—Limited Process. *Environmental Science and Technology* 1 (2): 157—160.

Cookson, John Thomas, Jr. (1970). Removal of Submicron Particles in Packed Beds. *Environmental Science and Technology* 4 (2): 128—134.

Cookson, John Thomas, Jr., and Wheeler J. North (1967). Adsorption of Viruses on Activated Carbon Equilibria and Kinetics of the Attachment of *Escherichia coli* Bacteriophage T₄ on Activated Carbon. *Environmental Science and Technology* 1 (1): 46—52.

Culp, Gordon (1974). Physical-Chemical Nitrogen Removal—Wastewater Treatment. Presented at Environmental Protection Agency Technology Transfer Seminar.

Culp, Russell L. and Gordon L. Culp (1971). *Advanced Wastewater Treatment*. Van Nostrand Reinhold, New York.

Dawson, R. N. and K. L. Murphy (1972). The Temperature Dependency of Biological Denitrification. *Water Research* 6: 71—83.

Delwiche, C. C. (1956)., in *Denitrification, A Symposium of Inorganic Nitrogen Metabolisms*, McElroy and Glass, Eds. Johns Hopkins Press, Baltimore, p. 233.

Downing, A. L. (1968). Factors to be Considered in the Design of Activated Sludge Plants, in *Advances in Water Quality Improvement*, E. F. Gloyna and W. W. Eckenfelder, Jr., Eds. University of Texas Press, Austin, pp. 190—202.

Downing, A. L. and G. Knowles (1967). Population Dynamics in Biological Treatment Plants, Vol. 2, in *Advances in Water Pollution Research*. Water Pollution Control Federation, Washington, D. C. pp. 117—136.

Duddler, Glen A. and Stevens E. Richardson (1973). Application of Plastic Media Trickling Filters for Biological Nitrification Systems. *Environmental Protection Technology Series EPA—R2—73—199*, U.S. Environmental Protection Agency, Washington, D. C. 112 pp.

Dwivedy, Ramesh C. (1973). Removal of Dissolved Organics Through Foam Fractionation in Closed Cycle Systems for Oyster Production. Paper No. 73—561. American Society of Agricultural Engineers. St. Joseph, Mich.

Eckenfelder, W. Wesley, Jr. (1969). Centrifugation, in *Manual of Treatment Processes*, Vol. 1, W. Wesley Eckenfelder, Jr., Ed., Environmental Science Service Corporation.

Engel, M. S. and M. Alexander (1958). Growth and Autotrophic Metabolism of *Nitrosomonas europaea*. *Journal of Bacteriology* 76: 217.

Fair, Gordon Maskew, John Charles Geyer, and Daniel Alexander Okun (1968). *Water and Wastewater Engineering*, Vol. 2, *Water Purification and Wastewater Treatment and Disposal*. Wiley, New York.

Fish Cultural Development Center (1970). *U.S. Fish and Wildlife Service, Quarterly Report*, March, Bozeman, Mont.

Gigger, Richard Pierce and R. E. Speece (1970). Treatment of Fish Hatchery Effluent for Recycle. Engineering Experimental Station Technical Report 67. New Mexico State University, Las Cruces.

Goldman, Joel C., Kenneth R. Tenore, John. H. Ryther, and N. Corwin (1974). Inorganic Nitrogen Removal in a Combined Tertiary Treatment—Marine Aquaculture System. I. Removal Efficiencies, *Water Research* 8: 45—54.

Goss, L. B. (1975). Factors to Consider in Designing a High—Density Catfish Raceway System. Paper No. 75—5540. American Society of Agricultural Engineers, St. Joseph, Mich.

Gotaas, Harold B. and William S. Galler (1973). Design Optimization for

Biological Filter Models. Journal of the Environmental Engineering Division, American Society of Civil Engineers EE6: 831—850.

Grieves, Robert B. and Dibakar Bhattacharyya (1965). The Foam Separation Process: A Model for Waste Treatment Applications. Journal of the Water Pollution Control Federation 37 (7): 980—989.

Grieves, Robert B. (1966). Foam Separation Processes from Industrial Waste Treatment: Phenol, Phosphate and Hexavalent Chromium. Proceedings of the 21 st Industrial Waste Conference, Part, 1, Engineering Extension Series No. 121: 192—202. Purdue University, West Lafayette, Ind.

Grieves Robert B. and Jerry L. Bewley (1972). Continuous Foam Separation and Activated Carbon Filtration to Clarify Dilute Colloidal Suspensions, Canadian Journal of Chemical Engineering 50: 261—265.

Hall, Marvin D. (1971). Design and Operation of a Fish Barn. Paper No. 71—A553, American Society of Agricultural Engineers, St. Joseph, Mich.

Hall, Marvin D. (1972). The Fish Barn. Agricultural Engineering 53 (5): 16.

Harvey, Richard M. and Jackson L. Fox (1973). Nutrient Removal Using Lemna minor, Journal of the Water Pollution Control Federation 45 (9): 1928—1938.

Haskell, David C. (1955). Weight of Fish per Cubic Foot of Water in Hatchery Troughs and Ponds. Progressive Fish-Culturist 17 (3): 117—118.

Haskell, D. C. (1959). Trout Growth in Hatcheries. N. Y. Fish and Game Journal 6: 204—237.

Hassler, John W. (1951). Active Carbon, Chemical Publishing Co., Brooklyn, N. Y.

Haug, Roger Tim and Perry L. McCarty (1971). Nitrification with the Submerged Filter. Paper presented at the Annual Conference of the Water Pollution Control Federation, San Francisco.

Huang, Ching-san and Ninnian E. Hopson (1974). Nitrification Rate in Biological Processes. Journal of the Environmental Engineering Division, American Society of Civil Engineering EE2: 409—421.

Hulbert, Roberts and Douglas Feben (1933). Hydraulics of Rapid Filter Sand. Journal of the American Water Works Association 25 (1): 20—65.

Hutchins, Roy A. (1973). New Method Simplifies Design of Activated Carbon Systems. Chemical Engineering 80 (19): 133—138.

Johnson, Paul W. and John McN. Sieburth (1974). Ammonia Removal by Selective Ion Exchange, A Backup System for Microbiological Filters in Closed—System Aquaculture. Aquaculture 4: 61—68.

Kown, Bong T. (1971). The Effects of Column Height and Diameter on the Effectiveness, of a Continuous Bubble Fractionation System. Water Research 5: 93—102.

Kunin, Robert (1950). Ion Exchange Resins. Wiley, New York.

Lemlich, Robert (1968). Questions and Answers on Foam Fractionation. Chemical Engineering, December 16, pp. 95—102.

Liao, Paul B. (1970). Salmonid Hatchery Wastewater Treatment. Water and Sewage Works 117 (12): 439—443.

Liao, Paul B. (1970). Pollution Potential of Salmonid Fish Hatcheries. Water and Sewage Works 117 (9): 291—297.

Liao, P. B. (1971). Water Requirements of Salmonids. Progressive Fish—Culturist 33 (4): 210—224.

Liao, Paul B. and Ronald D. Mayo (1972). Salmonid Hatchery Water Reuse Systems. Aquaculture 1 (1): 317—335.

Liao, Paul B. and Ronald D. Mayo (1974). Intensified Fish Culture Combining Water Reconditioning with Pollution Abatement. Aquaculture 3: 61—85.

Liao, P. B., R. D. Mayo, and S. W. Williams (1972). A Study for Development of Fish Hatchery Water Treatment Systems. Report prepared for U.S. Department of Army Corps of Engineers, Walla District, Walla Walla, Wash.

Lomax, K. M. (1975). Research Assistant Professor, Horn Point Environmental Laboratories, Center for Environmental and Estuarine Studies, University of Maryland, Cambridge. Personal communication.

Lomax, K. M. (1976). Nitrification with Waste Pretreatment on a Closed Cycle Catfish Culture System. Unpublished Ph. D. Thesis. Department of Agricultural Engineering, University of Maryland, College Park.

Lomax, K. M. and F. W. Wheaton (1975). Fish Culture Waste: Solids Affect Nitrification. Paper No. 75—5544. American Society of Agricultural Engineers, St. Joseph, Mich.

Lush, J. (1976) Orifice Aspirator as a Foam Fractionation Air Injection System: Desing Effects. Unpublished M. S. thesis, Department of Agricultural Engineering, University of Maryland, College Park.

Lyman, Bart, Gregory Ettelt, and Timothy McAloon (1969). Tertiary Treatment at Metro Chicago by Means of Rapid Sand Filtration and Microstrainers. *Journal of the Water Pollution Control Federation* 41: 2, Part I: 247—279.

Lyman, Bart T. and Vinton W. Bacon (1970). Filtration and Microstraining of Secondary Effluent, in *Water Quality Improvement by Physical and Chemical Processes*, E. F. Gloyna and W. W. Echenfelder, Jr., Eds. University of Texas Press, Austin, pp. 132—148.

McCarty, P. L., L. Beck, and P. P. St. Amant (1969). Biological Denitrification of Waste Waters by Addition of Organic Materials. Paper presented at the 24th Annual Purdue Industrial Waste Conference, Purdue University, West Lafayette, Ind.

McHarness, Donald D. and Perry L. McCarty (1973). Field Study of Nitrification with the Submerged Filter. *Environmental Protection Technology Series EPA—R2—73—158*, U.S. Environmental Protection Agency, Washington, D.C.

McHarness, Donald D., Roger T. Haug, and Perry L. McCarty (1973). Field Studies of Nitrification with Submerged Filters. Paper presented at the 46th Annual Conference of the Water Pollution Control Federation, Cleveland.

McIndoe, R. W. (1969). Diatomaceous Earth Filtration for Water Supplies. I. *Water and Wastes Engineering* 6 (10): 50—53.

McIndoe, R. W. (1969). Diatomaceous Earth Filtration for Water Supplies II. *Water and Wastes Engineering* 6 (11): 48—52.

Meade, Thomas L. (1974). The Technology of Closed System Culture of Salmonids. Marine Technical Report 30. Animal Science Department—National Oceanographic and Atmospheric Administration Sea Grant, University of Rhode Island. 30 pp.

Mercer B. W., L. L. Ames, C. J. Touhill, W. J. Van Slyke, and R. B. Dean (1970). Ammonia Removal from Secondary Effluents by Selective Ion Exchange. *Journal of the Water Pollution Control Federation* 42 (2), Part 2: R95—R107.

Myerhof (1916). *Archiv für die gesellschaft Physiologie* 164: 416.

Murphy, J. P. and R. I. Lipper (1970). BOD Production of Channel Catfish. *Progressive Fish—Culturist* 32 (4): 195—198.

Nelson, D. W., L. B. Owens, and R. E. Terry (1973). Denitrification as a Pathway for Nitrate Removal in Aquatic Systems. Technical Report 42. Water Resources Research Center, Purdue University, West Lafayette, Ind.

Nesbitt, John B. (1969). Phosphorus Removal—The State of the Art. *Journal of the Water Pollution Control Federation* 41 (5), Part 1: 701—713.

Nitrification and Denitrification Facilities (1973). U.S. Environmental Protection Agency, Technology Transfer Series, Washington, D.C.

Oakley, H. Roy and Terence Cripps (1969). British Practice in Tertiary Treatment of Wastewater. *Journal of the Water Pollution Control Federation* 41 (1): 36—50.

Page, Jimmy W. and James W. Andrews (1973). Efficiency of Two Types of Microbiological Filters for Removing Ammonia from Effluents of High Density Culture of Channel Catfish. Unpublished paper. Skidaway Institute of Oceanography, Savannah.

Parker, Nick C. and Bill A. Simco (1973). Evaluation of Recirculating Systems for the Culture of Channel Catfish. Paper presented at the 27th Annual Conference, Southeastern Association of Game and Fish Commissioners, Hot Springs, Ark.

Piper, R. G. (1970). Know the Proper Carrying Capacity of Your Farm. *American Fishes and U.S. Trout News*, May—June.

Pipes, Wesley O. and Sotiris P. Koutroyannis (1962). Light—Limited Growth of Chlorella in Continuous Cultures. *Applied Microbiology*, 10: 1—5.

Process Desing Manual for Suspended Solids Removal (1971) U.S. Environmental Protection Agency, Technology Transfer Series, Washington, D. C.

Process Design Manual for Carbon Adsorption (1973). U.S. Environmental Protection Agency, Washington, D. C.

Purchas, D. B. (1967). Filter Aids. *Chemical and Process Engineering* 48 (6): 95—99, 102.

Purchas, Derek B. (1971). *Industrial Filtration of Liquids*. 2nd. ed. Chemical Rubber Company Press. Cleveland.

Riddick, Thomas M. (1940). Filter Sand. *Journal of the American Water Works Association* 32 (1): 36—50.

Rubin, Eliezer and Elmer L. Gaden, Jr (1962). Foam Separation, in *New Chemical Engineering Separation Techniques*, Herbert M. Schoen, Ed. Wiley—Interscience, New York, pp. 319—385.

Sawyer, Clair N., Harry E. Wild, J. r., and Thomas C. McMahon (1973). *Nitrification and Denitrification Facilities—Wastewater*. U.S. Environmental Protection Agency, Technology Transfer Seminar Publication, Washington, D. C.

Schnepf, Robert W. and Elmer L. Gaden, Jr. (1959). Foam Fractionation of Proteins: Concentration of Aqueous Solutions of Bovine Serum Albumin, *Journal of Biochemical and Microbiological Technology and Engineering* 1(1): 1—8.

Sengupta, Ashis K. and W. O. Pipes (1964). Foam Fractionation—The Effects of Salts and Low Molecular Weight Organics on ABS Removal. *Proceedings of the 19th Industrial Waste Conference, Part II. Engineering Extension Series N. 117: 811—820*. Purdue University, West Lafayette, Ind.

Smisek, Milan and Slavoj Cerny (1970). *Active Carbon: Manufacture, Properties and Applications*, Elsevier, New York.

Smith, John M., Arthur N. Masse, Walter A. Feige and Lawrence T. Kamohake (1972). Nitrogen Removal from Municipal Waste Water by Columnar Denitrification. *Environmental Science and Technology* 6 (3): 260—267.

Speece, Richard E. (1973). Trout Metabolism Characteristics and the Rational Design of Nitrification Facilities for Water Reuse in Hatcheries. *Transactions of the American Fisheries Society* 102 (2): 223—334.

Spotte, Stephen H. (1970). *Fish and Invertebrate Culture. Water Management in Closed Systems*. Wiley—Interscience, New York.

Sproul, Otis J., Leo R. LaRochelle, David F. Wentworth, and Robert T. Thorup (1967). Virus Removal in Water Reuse Treating Processes. in *Water Reuse*, Lawrence K. Cecil, Ed. *Chemical Engineering Progress Symposium Series No. 78*, Vol. 63, pp. 130—136.

Sproul, Otis J., Murry Warner, Leo R. LaRochelle, and Dirk R. Brunner (1969). Virus Removal by Adsorption in Waste Water Treatment Processes, in *Advances in Water Pollutin Research. Proceedings of the Fourth International Conference*, Prague. Pergamon Press, New York, pp. 541—547.

Srinath, E. G., T.B.S. Prakasam, and R. C. Loenr (1974). A Technique for Estimating Active Nitrifying Mass and Its Application in Designing Nitrifying Systems. Paper presented at the *Industrial Waste Conference*, Purdue University, West Lafayette, Ind.

Srna, Richard F. (1975). Nitrification: Effect of Environmental Factors, *Sea Scope* 5 (2): 1—2.

Stankewich, M. J., Jr. (1972). Biological Nitrification with the High Purity Oxygen Process Paper. Presented at the 27th Annual Meeting of the Purdue Industrial Waste Conference, May 2—4, Purdue University, West Lafayette, Ind.

St. Amant, Percy P. and Perry L. McCarty (1969). Treatment of High Nitrate Waters. *Journal of the American Water Works Association* 61 (3): 659—662.

Sy, S. H., R. G. Koegel, D. R. Livermore, and H. D. Bruhn (1973) Utilization of Eurasian Watermilfoil (*Myriophyllum spicatum*). Paper No. 73—5510. American Society of Agricultural Engineers, St. Joseph, Mich.

Tebbutt, T. H. Y. (1971). An Investigation into Tertiary Treatment by Rapid Filtration. *Water Research* 5: 81—92.

Thomas, H. A. and R. S. Archibald (1952). Longitudinal Mixing Measured by Radioactive Tracers. *Transactions of the American Society of Civil Engineers* 116: 839.

Trowbridge, M. E. (1962). Problems in Scaling Up Centrifugal Separation

Equipment. Transactions of the Institution of Chemical Engineering 40 (4): A73—A87.

Water Treatment Plant Desing (1969). American Water Works Association. Inc., New York.

Weber J. Walter Jr. (1969). Principles and Applications of Adsorption, in Manual of Treatment Processes, Vol. 1, W. Wesley Echenfelder, Jr., Ed Environmental Science Services Corporation.

Weber, Walter J., Jr. and J. Cearrel Morris (1963). Kinetics of Adsorption on Carbon from Solutions. Journal of the Sanitary Engineering Division, Proceedings of the American Society of Civil Engineers 89 (SA2), Part 1: 31—59.

Weber, Walter J., Jr., and J. Carrel Morris (1964) Adsorption in Heterogeneous Aqueous Systems. Journal of the American Water Works Association 56 (4): 447—456.

Weber, Walter J., Jr., and J. Carrel Morris (1965). Kinetics of Adsorption in Columns of Fluidized Media. Journal of the Water Pollution Control Federation 37 (4): 425—443.

Westers, Harry (1970). Carrying Capacity of Salmonid Hatcheries. Progressive Fish—Culturist 32 (1): 43—46.

Westin, D. T. (1973). Nitrate and Nitrite Toxicity in Salmonid Fishes in Fresh and Brackish Waters. Unpublished M. S. thesis University of Rhode Island, Kingston.

Wheaton, F. W. (1973). Unpublished data.

Wheaton, F. W. (1975). Unpublished data.

Willoughby, Harvey (1968). A Method for Calculating Carrying Capacities of Hatchery Troughs and Ponds. Progressive Fish—Culturist 30(3): 173—174.

Wong—chong, G. M. and R. C. Loehr (1975). The Kinetics of Microbial Nitritification. Water Research 9: 1099—1106.

Глава 14. СПОСОБЫ ДЕЗИНФЕКЦИИ ВОДЫ

В промышленных хозяйствах аквакультуры необходимо проводить лечебные мероприятия и удалять хищников. Масштаб этих мероприятий зависит от плотности посадки и капитальных вложений. По мере ужесточения требований к качеству сточных вод и расширяющегося использования природных вод в рекреационных целях все более широкое применение находят замкнутые и полужамкнутые рециркуляционные системы. В таких системах плотности посадки культивируемых объектов обычно высоки, а вода частично или полностью рециркулируется. Оба эти фактора увеличивают опасность вспышки заболеваний. Поскольку замкнутые системы требуют больших капиталовложений, в них экономически целесообразно вести более жесткий контроль за болезнями, чем в открытых системах.

Наиболее серьезные заболевания, приводящие к массовой гибели культивируемых организмов, вызываются бактериями, вирусами и другими одноклеточными организмами. Существует несколько видов болезнетворных организмов, поселяющихся на животных в разное время и на разных этапах жизненного цикла. Как правило, споры болезнетворных организмов труднее обезвредить, чем сами организмы на неспоровой стадии. Дезинфекция — это обеззараживание систем для содержания культивируемых организмов и уничтожение болезнетворных организмов, которые могут причинить вред культивируемым объектам или их потреби-

телям. К опасным организмам относятся жаберные трематоды рыб, полиовирусы, возбудители ихтиофтириоза и вирусы инфекционного гепатита. Стерилизация — это полное уничтожение живых организмов во всем объеме воды в отличие от дезинфекции, при которой гибнут только болезнетворные организмы. Неопасные для потребителя организмы также могут быть уничтожены при дезинфекции. В системах для культивирования водных объектов стерилизацию проводить не обязательно, а во многих случаях она даже может уничтожить кормовые объекты или полезные микроорганизмы, например нитрифицирующие бактерии.

Дезинфекцию можно проводить разными способами, включая тепловую обработку воды, ультрафиолетовое облучение (УФ) и обработку химическими препаратами. Из химических методов наиболее широкое распространение получили хлорирование и озонирование воды, хотя иногда применяют и некоторые другие способы. К химической обработке также относят обработку воды с помощью ионов некоторых металлов, например серебра, используют также щелочи и кислоты, а в некоторых случаях поверхностно-активные химические вещества или различные окислители, например йод, бром, перманганат калия и перекись водорода. Ниже рассмотрены только способы дезинфекции воды с помощью тепловой обработки, ультрафиолетового облучения, озонирования и хлорирования.

Скорость гибели возбудителей заболеваний при дезинфекции может быть описана следующим уравнением:

$$dn/dt = -kN, \quad (14.1)$$

где dn/dt — скорость гибели микроорганизмов; k — постоянная скорости; N — численность живых микроорганизмов.

Интегрирование уравнения (14.1) в интервале от $t=0$ до $t=t$ и от N_0 до N_1 дает

$$\ln = N_1/N_0 = -kt, \quad (14.2)$$

где N_0 — число живых микроорганизмов перед дезинфекцией; N_1 — число живых микроорганизмов спустя время t .

Поскольку в большинстве случаев число погибших возбудителей выражают в процентах или в виде десятичного логарифма, удобнее преобразовать уравнение (14.2) в функцию десятичного логарифма. Кроме того, для исключения отрицательного знака переставлены местами N_0 и N_1 :

$$t = 2,3/k \log N_0/N_1. \quad (14.3)$$

Следовательно, зависимость t от $\log N_0/N_1$ представляет собой прямую линию на полулогарифмической шкале с наклоном, равным $2,3/k$. Следует также отметить, что N_1 никогда не достигает 0, поэтому к уравнению (14.3) применимо асимптотическое приближение. Если необходимо определить вероятность выживания микроорганизмов в одном случае из 1000, то $N_1=0,001$. По мере

уменьшения величины N_1 вероятность выживания опасных микроорганизмов уменьшается.

Постоянная k в уравнении (14.3) зависит от pH, температуры, концентрации дезинфицирующего вещества и связанных с ней параметров среды. Время, необходимое для гибели данных микроорганизмов, связано с концентрацией дезинфицирующего вещества следующей зависимостью:

$$tC_{dis}^n = K_1, \quad (14.4)$$

где t — время, необходимое для гибели определенного количества микроорганизмов; K_1 — постоянная; C_{dis} — концентрация дезинфицирующего вещества; n — коэффициент разведения.

Сделав необходимые преобразования и прологарифмировав уравнение (14.4), получаем

$$\ln t = K_2 - n \ln C_{dis}. \quad (14.5)$$

Поскольку n — это наклон прямой, характеризующей зависимости $\ln t$ от $\ln C$, величину n можно получить на основании экспериментальных данных. Она зависит от вида микроорганизмов, против которых ведется дезинфекция, и параметров среды. Если n превышает единицу, это указывает, что концентрация дезинфицирующего вещества достаточно велика и обладает высокой эффективностью; если n меньше единицы, время контакта дезинфицирующего вещества с микроорганизмами важнее величины самой концентрации дезинфицирующего вещества. При n , близком к единице, время контакта и концентрация дезинфицирующего вещества имеют одинаковое значение для эффективности дезинфекции (Fair et al., 1968).

Если окончательное содержание микроорганизмов известно, то уравнение (14.8) приобретает следующий вид:

$$t = K_3/k, \quad (14.6)$$

где K_3 — постоянная.

Приравняв уравнение (14.4) к уравнению (14.6) и решая его относительно k , получаем

$$k = (K_3/K_1)C_{dis}^n = K_4C_{dis}^n, \quad (14.7)$$

где K_1 , K_3 и K_4 — постоянные; k — постоянная скорости гибели микроорганизмов; C_{dis} и n — то же, что и в уравнении (14.4).

Уравнение (14.7) позволяет связать постоянную скорости гибели микроорганизмов с концентрацией дезинфицирующего вещества. Постоянную K_1 можно определить из уравнения (14.5) ($K_2 = \ln K_1$), а K_3 — по заданной численности микроорганизмов и уравнению (14.3), поскольку $K_3 = 2,3 \log N_0/N_1$.

Зависимость между температурой воды и постоянной скорости гибели микроорганизмов k по данным Аррениуса (Rich, 1963)

$$k = K_5 e^{-\Delta H/RT}, \quad (14.8)$$

где K_5 — постоянная; ΔH — энергия активации, кал; R — универсальная газовая константа (1,99 ккал/°C); T — абсолютная температура, К.

Логарифмируя уравнение (14.8) по основанию 10, получаем следующее уравнение:

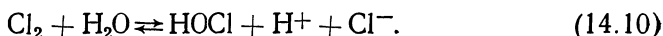
$$\log k = \log K_5 - \frac{0,434 \Delta H}{R} \frac{1}{T}. \quad (14.9)$$

Таким образом, двойная логарифмическая зависимость k от $1/T$ позволяет вычислить K_5 и ΔH (Rich, 1963).

Уравнение (14.7) позволяет определить влияние концентрации на постоянную скорости гибели микроорганизмов, а уравнение (14.9) — влияние температуры. К сожалению, влияние pH, концентрации питательных веществ и других параметров внешней среды на постоянную скорости гибели микроорганизмов определить значительно сложнее. На эти факторы оказывают существенное влияние специфические местные условия. При установлении подобной зависимости необходимо учитывать сочетание всех параметров среды в данный момент и в конкретных условиях.

ХЛОРИРОВАНИЕ

Различные формы хлора издавна широко применяются для дезинфекции воды, особенно отработанных вод. Чаще всего в качестве дезинфицирующего вещества хлор применяют в виде газа Cl_2 или гипохлорита Ca или Na. Газообразный хлор обладает высокой растворимостью в воде: 7160 мг/л при 20°C и давлении $1,013 \cdot 10^5$ Па (Rich, 1963). В воде хлор быстро гидролизуется с образованием хлорноватистой кислоты:



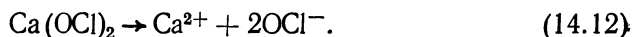
При низких концентрациях хлора (менее 1000 мг/л) и pH выше 3 практически весь хлор переходит в HOCl.

В водных растворах хлорноватистая кислота диссоциирует на ионы OCl^- и водорода:



Эта реакция зависит от pH (рис. 14.1).

Гипохлориты, например гипохлорит кальция, при растворении в воде диссоциируют:



Как видно из уравнения (14.11), ионы гипохлорита находятся с хлорноватистой кислотой в равновесии.

Хлор, HOCl и OCl^- — сильные окислители и поэтому вступают в реакцию и образуют различные соединения со многими химическими веществами. Одним из наиболее важных соединений, которое легко вступает в реакцию с хлорноватистой кислотой, является аммиак. При взаимодействии хлорноватистой кислоты с

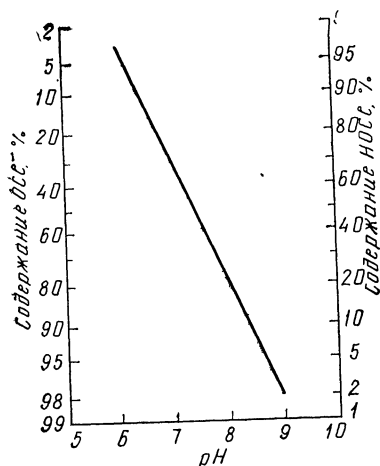


Рис. 14.1. Зависимость содержания хлорноватистой кислоты и гипохлорита от pH в водных растворах

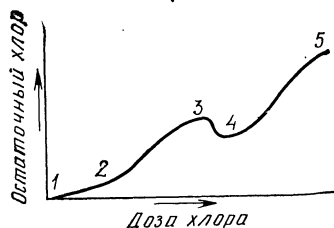
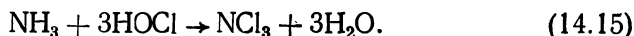
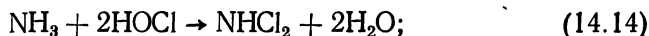
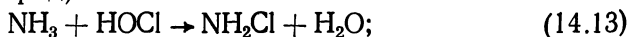


Рис. 14.2. Кривая хлорирования воды

аммиаком может образоваться монохлорамин, дихлорамин или трихлорамин (трихлорид):



Хлорамины могут образоваться также в результате реакции HOCl с органическими аминами, содержащимися в растворе. Постоянные равновесия для уравнений (14.13) — (14.15) зависят от pH, температуры раствора и соотношения концентраций NH_3 и HOCl. Соотношение в растворе аммиака (NH_3) и аммония NH_4^+ также зависит от pH.

HOCl и OCl^- часто называют свободным хлором, а хлорамины — связанным хлором. Токсичность свободного хлора и его соединений неодинакова для разных микроорганизмов и высших водных животных, наиболее токсичен свободный хлор. Соединение хлора удалить из раствора труднее, чем свободный хлор, поэтому чаще специально пользуются соединениями хлора, которые имеют более длительный срок остаточного воздействия.

В воде систем для культивирования содержится множество органических и неорганических соединений. Внесение в воду хлора обычно приводит к появлению некоторого его избытка, который называется остаточным хлором (рис. 14.2). По мере увеличения содержания хлора в воде кривая поднимается слева направо в виде ломаной линии. При увеличении дозы внесенного хлора от точки 1 к точке 2 он вступает в реакцию с находящимися в воде восстановителями: нитритами и ионами железа, при этом хлор восстанавливается до хлорида. Далее при увеличении дозы внесенного хлора от точки 2 к точке 3 он не расходуется на окисление восстановителей, так как все они окислены и дальнейшее увеличение концентрации хлора ведет к образованию хлорами-

нов, которые в свою очередь являются сложными соединениями свободного хлора с длительным сроком остаточного воздействия.

В точке 3 весь аммиак и органические амины уже вступили в реакцию с хлором, и свободный остаточный хлор начинает восстанавливаться. Концентрация свободного остаточного хлора становится критической и достаточной для начала процесса окисления хлораминов, образовавшихся в результате взаимодействия хлора и аммиака. Содержание остаточного хлора уменьшается и образуется соединения окисленного азота, такие, как трихлорамин (NCl_3) и закись азота. Особенно сложный процесс окисления хлораминов наблюдается при дальнейшем увеличении дозы хлора от точки 3 до точки 4 (рис. 14.2). Точка 4 обычно считается точкой перегиба.

После прохождения точки 4 остаточный хлор находится в виде устойчивых хлораминов, которые образуются в результате реакции хлора с органическими аминами и последующего взаимодействия с активным хлором.

Рич (Rich, 1963) считает, что скорость гибели микроорганизмов под действием хлора описывается следующим уравнением:

$$dN/dt = -kNt. \quad (14.16)$$

Интегрируя уравнение (14.15) и логарифмируя его по основанию 10, получаем

$$t^2 = (4,6/k) \log N_0/N_1, \quad (14.17)$$

где все обозначения те же, что и в уравнениях (14.1) и (14.2).

Использование хлора в качестве дезинфицирующего вещества для борьбы с различными микроорганизмами весьма опасно для культивируемых объектов. Большинство водных организмов очень чувствительны даже к низким концентрациям хлора (табл. 14.1).

Таблица 14.1. Содержание общего остаточного хлора, обеспечивающее 50%-ную выживаемость спустя 96 ч для некоторых рыб (Kelly, 1974)

Вид	Содержание общего остаточного хлора, мг/л	Вид	Содержание общего остаточного хлора, мг/л
Кижуч	0,102	Чукучан	0,138
Палия	0,135	Судак	0,150
Желтый окунь	0,205	Гольян	0,086—0,130
Большеротый окунь	0,295	Спот	0,09

Кроме того, хлор и хлорамины весьма токсичны (Kelly, 1974), поэтому применение хлора в качестве дезинфицирующего вещества в системах для культивирования организмов требует длительной экспозиции с тем, чтобы из выростных емкостей был удален весь активный хлор и хлорамины. Для обработки сточных вод

обычно требуется около 30 мин при содержании 1—2 мг/л остаточного хлора в конце обработки. Однако Лиу и др. (Liu et al., 1971) установили, что время контакта, необходимое для гибели 99,99 % различных вирусов при температуре 2 °С и содержании остаточного свободного хлора 0,5 мг/л, варьирует от 2,7 до 120 мин.

Хлор и хлорамины можно удалить из воды химическим путем или с помощью адсорбции. Наиболее эффективной считается адсорбция с помощью активного древесного угля. Для удаления хлора и хлораминов из воды можно использовать такие восстановители, как тиосульфат натрия и соли железа (Coventry, 1935). Однако вносимые в воду химикаты и продукты их реакции следует перед употреблением проверять на токсичность по отношению к культивируемым объектам. Хлор можно удалять также путем аэрации воды. Полная аэрация действительно удаляет весь хлор, но некоторые исследователи сомневаются, что аэрация способна удалить хлорамины, особенно из воды, содержащей большое количество органических веществ.

Из-за токсичности хлора и хлораминов для водных объектов особую осторожность необходимо проявлять при дезинфекции воды, используемой для культивирования. Даже при удалении остатков дезинфицирующего вещества с помощью активного угля перед подачей воды в замкнутые или полужамкнутые системы опасность гибели культивируемых организмов от хлора велика.

ТЕПЛОВАЯ ОБРАБОТКА

Воду можно простерилизовать или продезинфицировать, значительно повысив ее температуру и выдержав при этой температуре определенное время. При этом гибель бактерий будет зависеть от температуры, времени выдерживания, а также вида бактерий или вирусов, против которых направлена обработка воды. Сходные процессы — пастеризация молока и тепловая обработка консервов. Например, молоко можно пастеризовать при 60 °С в течение 30 мин или при 71,1 °С в течение 15 с. Тепловая обработка — наиболее эффективный и очень удобный способ дезинфекции, поскольку эффективность обработки в данном случае зависит от температуры и времени выдерживания.

Самым большим недостатком метода тепловой обработки воды является его стоимость. Поскольку удельная теплоемкость воды высока, для повышения температуры требуются значительные энергетические затраты. Кроме того, после дезинфекции этим методом воду перед подачей в выростные емкости необходимо охлаждать, чтобы культивируемые организмы не пострадали. Хотя в основном охлаждение воды происходит в теплообменниках, для полного охлаждения используют механические холодильники или какие-либо другие источники охлаждения, что также требует энергетических затрат.

УЛЬТРАФИОЛЕТОВОЕ ОБЛУЧЕНИЕ

Даунс и Блант (Downs, Blunt, 1878) обнаружили, что солнечные лучи обезвреживают некоторые виды бактерий. Позднее Уорд (Ward, 1893) подтвердил, что ультрафиолетовая часть солнечного спектра действует губительно на бактерии. Ультрафиолетовое излучение включает волны длиной примерно от 150 Å (верхняя граница рентгеновских лучей) до 4000 Å (нижняя граница видимой части спектра).

Независимо от характера излучения (видимое, инфракрасное или ультрафиолетовое) энергия света выделяется в виде дискретных единиц, или квантов. Энергия одного кванта зависит от длины волны:

$$E = h_p \frac{c}{\lambda}, \quad (14.18)$$

где E — энергия одного кванта, эрг; h_p — постоянная Планка ($6,62 \cdot 10^{-27}$ эрг); c — скорость света ($3 \cdot 10^{10}$ см/с); λ — длина волны излучения, см.

По мере уменьшения длины волны света или увеличения частоты энергия одного кванта возрастает, поэтому квант света в ультрафиолетовой области обладает большей энергией, чем квант света в видимой.

Эффективность ультрафиолетового излучения для борьбы с бактериями, грибами и вирусами зависит от длины волны (рис. 14.3). Наиболее эффективна длина волны 2600 Å. Излучение большей и меньшей длины волны оказывает меньшее бактерицидное действие. Было установлено, что эффективность ультрафиолетового света длиной волны 3200 Å составляет лишь 0,4 % эффективности ультрафиолетового света длиной волны 2600 Å, а свет с длиной волны 7000 Å (видимый диапазон волн) составляет лишь 0,002 % эффективности света с длиной волны 2600 Å (Koller, 1965).

В настоящее время механизм действия ультрафиолетового излучения на микроорганизмы неизвестен. Однако есть данные, свидетельствующие о том, что ультрафиолетовое излучение действует на нуклеиновую кислоту. Филлипс и Ханел (Phillips and Hanel, 1960) считают, что основная реакция в этом процессе фотохимическая.

Выживаемость микроорганизмов под действием ультрафиолетового облучения можно рассчитать по уравнению (14.2). Обычно константы представляют в виде произведения новой константы k и величины интенсивности ультрафиолетового излучения I

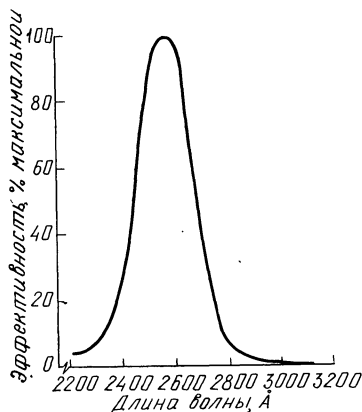


Рис. 14.3. Сравнительная обезвреживающая способность ультрафиолетовых ламп в зависимости от длины волны (Phillips and Hanel, 1960)

$$N_1/N_0 = e^{-k_1 I t}, \quad (14.19)$$

где k_1 — константа; I — интенсивность ультрафиолетового излучения, мВт/см²; N_1 , N_0 и t — те же, что и в уравнении (14.2).

Если интенсивность ультрафиолетового света в единицу времени принять равной $1/k$, то получим e в степени -1 , а $e^{-1} = 0,368$. Таким образом, выживаемость микроорганизмов $N_1/N_0 = 0,368$. Дозу ультрафиолетового облучения, при которой выживают 36,8 % микроорганизмов, обычно называют средней летальной дозой, летальной экспозицией или дозой инактивации (Koller, 1965). Эта величина зависит от вида микроорганизмов, мутности воды, толщины облучаемого слоя и влажности воздуха, если обработка воды ведется на воздухе, а также от ряда других факторов. Значения k_1 можно определить по графику зависимости N_1/N_0 от $I t$, построенного в полулогарифмическом масштабе. Угол наклона прямой и будет величиной $-k_1$.

Уравнение (14.19), которое является экспоненциальной функцией, показывает, что в принципе одного кванта радиации достаточно для гибели одного микроорганизма (Koller, 1965). Результаты ультрафиолетового облучения воды иногда можно изобразить в виде S-образной кривой. Коллер (1965) считает, что S-образная кривая обусловлена множественным эффектом воздействия (более 1 кванта энергии) на отдельный организм или разовым эффектом воздействия на группу организмов. Как S-образные, так и экспоненциальные кривые, описывающие гибель микроорганизмов, зависят от их вида, способа и характера облучения и стадии развития. Поскольку по бактериальному составу точные данные отсутствуют, очень трудно определить, какую форму кривой следует применить к выбранной системе.

Уравнение (14.19) также показывает, что выживаемость зависит от интенсивности ультрафиолетового облучения и времени экспозиции. Так, одинаковая выживаемость может быть достигнута при кратковременной экспозиции и высокой интенсивности облучения, и наоборот, при длительной экспозиции и низкой интенсивности облучения. Эта взаимозависимость справедлива лишь в том случае, если время экспозиции почти совпадает с периодом регенерации возбудителей заболеваний, против которых ведется облучение.

В отличие от химических дезинфицирующих веществ температура от 5 до 37 °C незначительно влияет на эффективность ультрафиолетового облучения при борьбе с бактериями (Koller, 1965). Филлипс и Ханел (1960) в обзоре литературы по влиянию температуры на эффективность ультрафиолетового облучения при длине волны 2540 Å указывают, что повышение температуры в диапазоне от 5 до 36 °C увеличивает эффективность облучения. Однако они не вывели математической закономерности этого явления. Несмотря на то что в этом предположении есть некоторые несоответствия, вполне очевидно, что температура слабо влияет на выживаемость микроорганизмов в пределах темпера-

турной толерантности того вида микроорганизмов, против которого направлено облучение.

В табл. 14.2—14.4 представлены данные по интенсивности ультрафиолетового облучения, вызывающей 90 или 100 %-ную ги-

Таблица 14.2. Энергия ультрафиолетового облучения, вызывающая 90%-ную гибель микроорганизмов на агаровых пластинках (Phillips and Hanel, 1960)

Микроорганизмы	Энергия ультрафиолетового излучения, вызывающая 90%-ную гибель микроорганизмов, мкВт·с/см ²	Микроорганизмы	Энергия ультрафиолетового излучения, вызывающая 90%-ную гибель микроорганизмов, мкВт·с/см ²
<i>Bacillus anthracis</i>	4520	<i>Salmonella enteritidis</i>	4000
<i>B. megaterium</i> sp. ¹	1130	<i>Salmonella typhimurium</i> ³	8000
<i>B. megaterium</i> sp. ²	2730	<i>Sarcina lutea</i>	19700
<i>B. paratyphosus</i> ³	3200	<i>Serratia marcescens</i>	2420
<i>B. subtilis</i> ⁴	7100		2200
<i>B. subtilis</i> ²	6000		830
	12000	<i>Dysentery bacilli</i> ⁵	2200
<i>Corynebacterium diphtheriae</i>	3370	<i>Shigella paradysenteriae</i>	1680
<i>Eberthella typhosa</i>	2140	<i>Spirillum rubrum</i>	4400
<i>Escherichia coli</i>	3000	<i>Staphylococcus albus</i>	1840
<i>Micrococcus candidus</i>	6050		3300
<i>Micrococcus piltonesis</i>	8100		1840
<i>Micrococcus sphaeroides</i>	10000		2180
<i>Neisseria catarrhalis</i>	4400	<i>Staphylococcus albus</i>	2600
<i>Phytomonas tumefaciens</i>	4400		4950
<i>Proteus vulgaris</i>	2640	<i>Streptococcus hemoliticus</i>	2160
<i>Pseudomonas aeruginosa</i>	5500	<i>Streptococcus lactis</i>	6150
<i>Pseudomonas fluorescens</i>	3500	<i>Streptococcus viridans</i>	2010

¹ Вегетативная форма.

² Споры.

³ В среднем три штамма.

⁴ Смесь разных форм.

⁵ В среднем пять штаммов.

бель различных микроорганизмов. На рис. 14.4 и 14.5 представлены те же данные, но в несколько иной форме. Некоторые из этих данных расходятся, поскольку они взяты из разных источников. Кроме того, на интенсивность облучения и гибель микроорганизмов оказывали влияние различия в степени окраски, концентрации клеток и возрасте культур, а также другие показатели. В связи с этим интенсивность облучения должна быть несколько большей, чем указано в таблицах, но с учетом фактора безопасности. Для дезинфекции воды требуемая доза облучения в 5—10 раз превышает дозу, необходимую для достижения того же

Таблица 14.3. Энергия ультрафиолетового облучения с длиной волны 2537 Å, вызывающая 90 и 100%-ную гибель микроорганизмов (Phillips and Hanel, 1960)

Микроорганизмы		Энергия ультрафиолетового излучения, мкВт·с/см ²	
		90%	100%
Бактерии			
Bacillus anthracis		4250	8700
S. enteritidis		4000	7600
B. megaterium sp. (veg) ¹		1300	2500
B. megaterium sp. (spores) ²		2730	5200
B. paratyphosus		3200	6100
B. subtilis		5800	11000
B. subtilis spores ²		11600	22000
Corynebacterium diphtheria		3370	6500
Eberthella typhosa		2140	4100
Escherichia coli		3000	6600
Micrococcus candidus		6050	12300
Micrococcus sphaeroides		10000	15400
Neisseria catarrhalis		4400	8500
Phytomonas tumefaciens		4400	8500
Proteus vulgaris		3000	6600
Pseudomonas aeruginosa		5500	10500
Pseudomonas fluorescens		3500	6600
S. typhimurium		8000	15200
Sarcina lutea		19700	26400
Serratia marcescens		2420	6160
Dysentery bacilli		2200	4200
Shigella paradysenteriae		1680	3400
Spirillum rubrum		4400	6160
Staphylococcus albus		1840	5720
Staphylococcus aureus		2600	6600
Streptococcus hemolyticus		2160	5500
Streptococcus lactis		6150	8800
Streptococcus viridans		2000	3800
Дрожжи			
Saccharomyces ellipsoideus		6000	13200
Saccharomyces sp.		8000	17600
Saccharomyces cerevisiae		6000	13200
пивные		3300	6600
хлебопекарные		3900	8800
в таблетках		6000	13200
Грибковые споры			
	Цвет		
Penicillium roqueforti	Зеленый	13000	26400
Penicillium expansum	Оливковый	13000	22000
Penicillium digitatum	»	44000	88000
Aspergillus glaucus	Голубовато-зеленый	44000	88000
Aspergillus flavus	Желтоватый	60000	99000
Aspergillus niger	Черный	132000	330000
Rhizopus nigricans	»	111000	220000
Mucor racemosus A	Серо-белый	17000	35200
Mucor racemosus B	Белый	5000	11000
Oospora lactis	»	5000	11000

¹ Вегетативная форма.

² Споры.

Таблица 14.4. Энергия ультрафиолетового излучения, вызывающая 100%-ную гибель микроорганизмов (Kelly, 1974)

Микроорганизмы	Энергия ультрафиолетового излучения, мкВт·с/см ²
Грибковые споры	
Penicillium roqueforti	26400
Aspergillus niger	330000
Дрожжи	
пивные	6600
хлебопекарные	8800
в таблетках	13200
Бактерии	
Streptococcus hemolyticus	5500
Staphylococcus aureus	6600
Escherichia coli	7000
Proteus vulgaris	7500
Bacillus subtilis	11000
Bacillus subtilus ¹	22000
Вирусы	
бактериофага (E. coli)	6600
гриппа (Influenza virus)	3400
Яйца червей	40000

¹ Споры

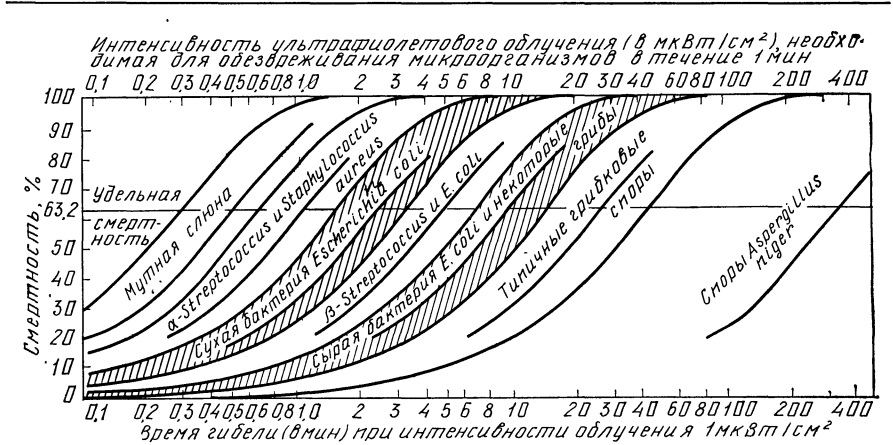


Рис. 14.4. Интенсивность ультрафиолетового облучения, необходимая для обезвреживания некоторых организмов (Kelly, 1974)

эффекта на воздухе (Phillips, Hanel, 1960). По данным других исследователей — в 40—50 раз (General Electric Company, 1953). В табл. 14.5 представлены интенсивности ультрафиолетового облучения, вызывающие различный процент гибели *Serratia marcescens*, а в табл. 14.6 — интенсивности облучения, вызывающие гибель некоторых других микроорганизмов.

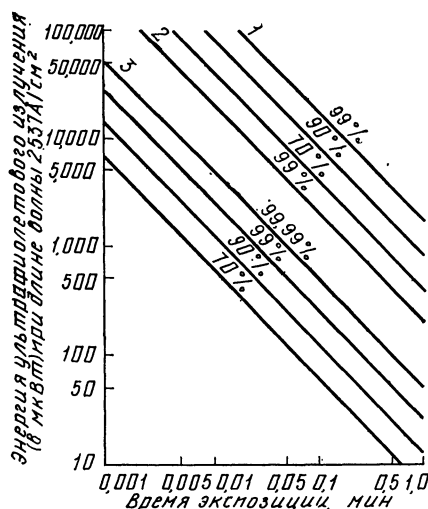


Рис. 14.5. Интенсивность ультрафиолетового облучения с длиной волны 2537 Å, необходимая для достижения определенного процента гибели некоторых микроорганизмов (бактерий и грибов) (Phillips and Hanel, 1960):
1 — 99 %-ная гибель устойчивых грибов;
2 — 99 %-ная гибель некоторых грибов *E. coli* в воде; споробразующих бактерий, *B. subtilis*; 3 — 99,99 %-ная гибель *E. coli* (в сухом виде), вирусов

Вода поглощает световую энергию большинства длин волн. Однако степень поглощения зависит от длины волны; мутности воды и других факторов. Через воду сравнительно легко проходят ультрафиолетовые лучи с длиной волны около 2600 Å, губительной для бактерий. На рис. 14.6 представлена пропускная способность воды с различными коэффициентами поглощения для ультрафиолетового излучения с длиной волны 2537 Å.

Прохождение ультрафиолетовых лучей через воду выражается следующей экспоненциальной зависимостью:

$$TR/(1 - RF) = e^{-ad}, \quad (14.20)$$

где TR — пропускная способность воды в отношении ультрафиолетовых лучей, %; a — коэффициент поглощения, см^{-1} ; d — толщина слоя воды, см; RF — поверхностное отражение для воды в десятичных долях; $RF=0,02$.

Изобразив графически зависимость пропускной способности воды для ультрафиолетовых лучей от толщины ее слоя на полулугарифмической бумаге, получаем прямую линию с наклоном, равным коэффициенту поглощения. На рис. 14.6 показана серия таких линий, характеризующих проникающую способность воды с различными коэффициентами поглощения для ультрафиолетовых лучей (в %).

Таблица 14.5. Смертность *Serratia marcescens* в дистиллированной воде под действием различных доз ультрафиолетового облучения лампой с горячим катодом мощностью 30 Вт (Phillips and Hanel, 1960).

Энергия ультрафиолетового излучения, мкВт·с/см ²	Смертность, %	Энергия ультрафиолетового излучения, мкВт·с/см ²	Смертность, %
420	0	4500	98,59
540	40	6000	99,62
750	45	7500	99,905
900	50	10200	99,989
1080	68,2	15000	99,991
1500	72,3	15300	99,991
2700	77,7	20400	99,995
3720	94,75	25500	99,999
4320	98,27	51000	99,9999

Таблица 14.6. Энергия ультрафиолетового излучения, вызывающая различную смертность некоторых микроорганизмов (Koller, 1965)

Микроорганизмы	Смертность, %	Энергия ультрафиолетового излучения, мкВт·с/см ²
Грибы	99,99	192000
	99,0	96000
	90,0	48000
Споровые формы и <i>E. coli</i> в воде	99,99	24000
	99,0	12000
	90,0	6000
<i>E. coli</i> (в сухом виде) и вирусы	99,99	3000
	99,0	1500
	90,0	750

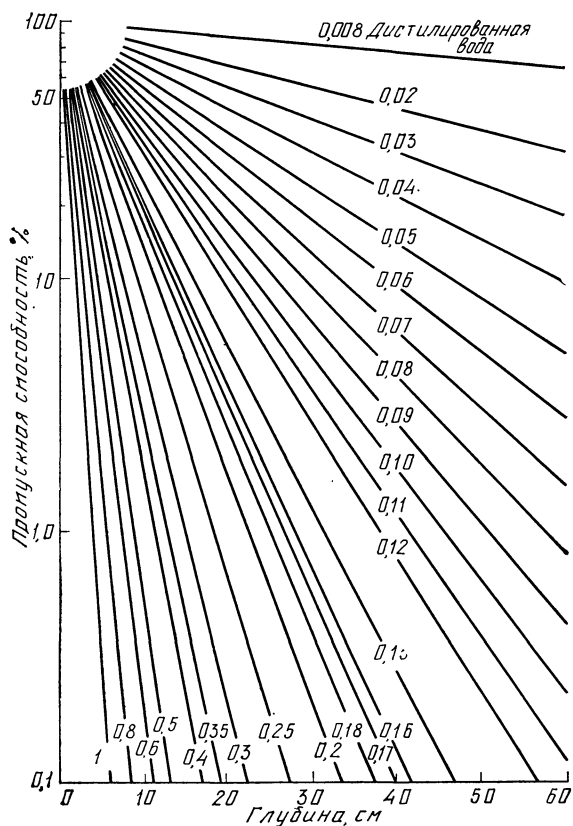


Рис. 14.6. Проникающая способность ультрафиолетовых лучей с длиной волны 2537 Å через воду с постоянным коэффициентом абсорбции (Koller, 1965)

Коэффициент поглощения для данной пробы воды можно установить только экспериментально. Дистиллированная вода хорошо пропускает ультрафиолетовый свет с длиной волны 2537 Å или более. Более короткие волны поглощаются водой сильнее. Примеси значительно снижают пропускную способность воды. Многозарядные соли и органические вещества снижают пропускную способность воды (Phillips and Hanel, 1960). Морская вода поглощает ультрафиолетовые лучи сильнее, чем пресная, поскольку она содержит больше ионов. Содержащийся в воде планктон, ил и другие вещества снижают ее пропускную способность.

Ультрафиолетовые лампы. Для ультрафиолетового облучения используются различные типы ламп, но почти все они содержат пары ртути. Электрический ток, проходя через пары ртути, возбуждает атомы до различных энергетических уровней. Возвращаясь снова на более низкий энергетический уровень, атомы излучают электромагнитные колебания определенной длины волны. Поскольку все атомы обладают несколькими энергетическими уровнями, длина волны, излучаемая ими, зависит от уровней между которыми осуществляется переход. Вероятность определенного энергетического перехода зависит от количества и химического состояния ртути, давления ее паров и электрических условий выделения энергии (Phillips and Hanel, 1960).

Для ртутных ламп низкого давления характерно очень низкое давление паров ртути (53—267 Па). Существуют ультрафиолетовые лампы высокого давления (от $0,5 \cdot 10^5$ до $76 \cdot 10^5$ Па), но наиболее широкое распространение получили все-таки лампы низкого давления. Это объясняется прежде всего их сравнительно низкой стоимостью. Кроме того, они излучают 95 % энергии в узком диапазоне длин волн приблизительно 2537 Å. Такая длина волны близка к 2600 Å, т. е. к длине волны, обладающей наиболее эффективным бактерицидным действием.

Существует три типа ламп низкого давления паров ртути: с горячим катодом, холодным катодом и высокоинтенсивные.

Лампы с горячим катодом работают на низком напряжении с использованием балласта подобно обычным лампам накаливания. Включение ламп происходит с помощью газа аргона и специального устройства, предотвращающего нагрев электродов. Электроды, расположенные на концах трубки, представляют собой вольфрамовую нить, покрытую окислами кальция, бария или стронция. Срок службы ламп зависит от срока работы электродов (сокращение срока службы может произойти из-за частого включения и выключения ламп). Соляризация — это медленное потемнение стекла, пропускающего ультрафиолетовые лучи при длительном воздействии на него ультрафиолетовых лучей высокой интенсивности. Лампы с горячим катодом темнеют сравнительно быстро, имеют низкий выход и с трудом включаются в режим при низких температурах. На рис. 14.7 показано влияние температуры стенок лампы на процентный выход энергии при длине

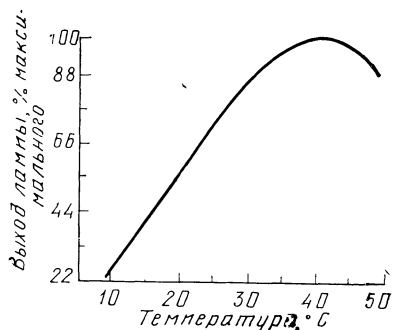


Рис. 14.7. Влияние температуры воды на эффективность работы лампы с длиной волны 2537 Å при ее непосредственном контакте с водой (Luckiesh et al., 1947)

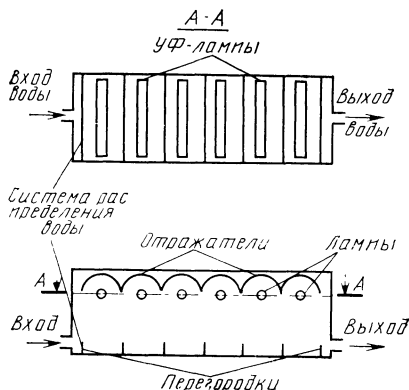


Рис. 14.8. Подвесной ультрафиолетовый стерилизатор с отражателем

волны 2537 Å. Филлипс и Ханел (1960) считают, что при температуре стенок лампы, равной 0°C, эффективность работы лампы составляет менее 10 % эффективности работы лампы с температурой стенок 38 °C.

Выход энергии ультрафиолетового излучения на 1 Вт подводимой энергии у ламп с холодным катодом примерно такой же, как и у ламп с горячим катодом. Однако у них есть свои преимущества и недостатки по сравнению с лампами с горячим катодом. Низкие температуры в начале работы лампы не влияют на ее характеристики прежде всего потому, что для включения этих ламп требуется высокое напряжение. Как видно из названия этих ламп, никелевому электроду не требуется предварительный нагрев. Поскольку электроды работают в «холодном» режиме, срок службы таких ламп зависит прежде всего от скорости потускнения стекла (снижение пропускной способности для ультрафиолетового света). В таких лампах помимо паров ртути содержатся еще аргон и неон (Phillips and Hanel, 1960). Лампы с холодным катодом способны создавать низкие и высокие концентрации озона в зависимости от характеристик пропускной способности стекла, из которого выполнена трубка лампы.

Высокоинтенсивные бактерицидные лампы представляют собой своеобразную комбинацию ламп с холодным и горячим катодом. Для пуска бактерицидных ламп высокой интенсивности требуется ток высокого напряжения, как для ламп с холодным катодом, однако после включения они работают как лампы с горячим катодом. Срок службы таких ламп зависит от срока службы электрода и находится в обратно пропорциональной зависимости от частоты включения. Основным преимуществом этих ламп является

ся высокий выход энергии, значительно превышающий выход энергии у ламп с холодным или горячим катодом из-за более высокой пропускной способности стекла трубки лампы. Они дают незначительное количество озона, хотя могут быть снабжены специальным стеклом, позволяющим получать некоторое количество озона. В табл. 14.7 представлены общие характеристики трех типов ртутных ламп низкого давления.

Таблица 14.7. Общая характеристика бактерицидных ламп с низким давлением паров ртути (с холодным и горячим катодом) и высокоинтенсивных ламп* (Phillips and Hanel, 1960)

Характеристика лампы	С горячим катодом	С холодным катодом	Высокой интенсивности
Мощность, Вт	30	17	39
Общая длина, см	76,2	88,3	76,2
Диаметр трубки, см	2,54	1,6	1,9
Рабочее напряжение, В	103—108	410	130
Сила тока, А	0,34	0,05	0,42
Срок службы, ч	7500	17500	7500
Интенсивность излучения на расстоянии 1 м от лампы, мкВт·с/см ²	72—80	46	120
Выход энергии ультрафиолетового излучения, Вт при длине волны 2537 Å	7,2—8,4	5,2	13,8

* В таблице представлены осредненные данные. Для получения сведений о каком-либо определенном типе ламп необходимо обращаться к изготовителю.

Помимо ртутных ламп низкого давления существует еще несколько типов ртутных ламп высокого давления. Однако для дезинфекции воды эти лампы широко не применяются, поскольку они уступают лампам низкого давления по следующим показателям: эффективность превращения электроэнергии в радиационную ниже; выход энергии распределяется в большем диапазоне длин волн, и, таким образом, эти лампы обладают менее эффективным бактерицидным действием; срок службы ламп высокого давления меньше; лампы высокого давления дороже прежде всего из-за того, что им требуется ток высокого напряжения, сравнительно более дорогой, лампы высокого давления дают значительные количества озона, если их используют без стекла, которое отсекает диапазон волн, производящих озон.

Обычные люминесцентные лампы, особенно напряжением 500 Вт и выше, дают некоторое количество ультрафиолетовых лучей но количество этих лучей, получаемое с 1 Вт, слишком мало, чтобы использовать их в качестве бактерицидных. Выход ультрафиолетовых лучей в стандартных флуоресцентных лампах варьирует в зависимости от содержания фосфора, но обычно они имеют очень низкую эффективность перехода электрической энер-

тии в ультрафиолетовое излучение, что не позволяет использовать их в качестве бактерицидных.

Солнечный свет содержит значительное количество ультрафиолетовых лучей и может оказывать некоторое бактерицидное действие при условии, что на пути света не стоит какое-либо стекло или пластик, который не пропускает ультрафиолетовых лучей.

Интенсивность солнечной ультрафиолетовой радиации с длиной волны менее 3132 Å варьирует от 0 на восходе и закате солнца до максимума, равного 80 мкВт·с/см², в ясный день в Вашингтоне (Koller, 1965). Солнечная ультрафиолетовая радиация зависит от широты местности, сезона года, облачности, влажности и других факторов, поэтому, хотя солнечная радиация и оказывает некоторое дезинфицирующее действие, она ненадежна из-за метеорологических условий.

Устройство стерилизаторов. Существует два основных типа ультрафиолетовых дезинфицирующих установок: подвесные и погружные. Подвесные установки иногда оборудуются отражателями, а в погружных возможен непосредственный контакт лампы с водой.

Подвесные установки. Схема такой установки представлена на рис. 14.8. Ультрафиолетовые лампы подвешиваются над лотком, по которому протекает вода. Обычно лампы располагают на высоте 10—20 см над поверхностью воды. При минимальном расстоянии от поверхности воды до лампы интенсивность облучения наибольшая, поскольку без отражателей интенсивность облучения лампой пропорциональна квадрату расстояния от лампы. Если лампа расположена слишком близко от поверхности воды, то интенсивность облучения неодинакова по длине лотка, а брызги воды, попадающей на лампу, могут ее повредить. Основным преимуществом такой установки является то, что она может работать на воздухе, поскольку температура воды не влияет на эффективность работы лампы, особенно если воздух под лампами хорошо вентилируется. Чистку лампы производят, сдвигая в сторону или приподнимая крышку. Лампу можно просто протирать тряпкой.

На эффективность работы подвесных установок влияют толщина слоя воды и ее качество, расстоянием между лампой и поверхностью воды, площадью, облучаемая лампой, и проточность воды. Степень обеззараживания зависит от сочетания этих параметров. Толщина слоя воды и ее качество взаимосвязаны, поскольку толщина облучаемого слоя определяется коэффициентом поглощения [см. уравнение (14.20)]. Коэффициент поглощения зависит от качества воды, особенно от мутности.

Промышленные подвесные установки предназначены для работы при содержании взвешенных веществ, не превышающем 240 мг/л. Однако при одинаковой дозе облучения в подвесной установке допустимый расход при содержании взвешенных веществ 240 мг/л составлял 5 л/мин и 15 л/мин при 70 мг/л (Hill et al., 1967).

Очень важный показатель — расстояние между лампами и от ламп до поверхности воды. Как уже отмечалось, расстояние между поверхностью воды и лампами должно быть достаточным для обеспечения однородной интенсивности облучения по всей длине лотка и защиты ламп от брызг. В установке Келли—Перди, которая использовалась в США для дезинфекции воды во время очистки моллюсков, лампы были расположены на расстоянии 15 см друг от друга и 15 см от поверхности воды. В этой установке отражатели отсутствовали (Furfiagi, 1966). Лакиш и Холладей (Luckiesh and Holladay, 1944) рекомендуют установку с 30-ваттными лампами для дезинфекции воды в бассейнах. В этой установке использован отражатель, установленный на краю бассейна. Из-за конструкции отражателя лампы располагались на высоте 25 см от поверхности воды. На поверхности воды интенсивность ультрафиолетового облучения составляла 610 мкВт/см^2 .

Действительная интенсивность облучения на поверхности воды в подвесных установках почти полностью зависит от устройства отражателя, поэтому при использовании отражателя необходимо сначала провести эксперименты и сделать математические расчеты интенсивности облучения при требуемой высоте монтажа ламп. Филлипс и Ханел (1960) рассчитали интенсивность облучения лампами с холодным катодом без отражателя и с двумя отражателями. Интенсивность облучения в любой точке зависит от материала, из которого изготовлен отражатель, ориентации и расположения ламп относительно отражателя и типа ламп. Поскольку математически выразить эту зависимость от всех параметров сложно, практичнее приобрести прибор для определения интенсивности ультрафиолетового излучения (фирма «Вестингхауз электрик корпорейшн» выпускает такие приборы) и измерять интенсивность ультрафиолетового излучения на разном расстоянии при различных вариантах расположения лампы и отражателя. Впоследствии эти данные можно использовать при монтаже установки. Фирмы — изготовители ламп тоже могут располагать информацией об интенсивности излучения при различных вариантах расположения ламп и отражателей, а также об интенсивности ультрафиолетового излучения на разном расстоянии для каждой лампы. В табл. 14.8 представлены некоторые из этих данных для различных типов ультрафиолетовых ламп, выпускаемых фирмой «Дженерал электрик». Эти данные можно использовать для установок, предназначенных для дезинфекции воды, но при этом следует учитывать, что в собранной подвесной установке эффективность работы ламп будет ниже, поскольку более половины энергии теряется из-за поглощения ультрафиолетовых лучей поверхностями покрытий, за исключением тех случаев, когда внутренние поверхности покрытий хорошо отражают ультрафиолетовые лучи.

При ультрафиолетовом облучении толщина слоя воды должна быть такой, чтобы 90 % или более падающей энергии поглощалась водой. Более низкая эффективность использования падающей энергии приводит к сильному ее поглощению поверхностями или

Т а б л и ц а 14.8. Максимальная интенсивность ультрафиолетового излучения некоторых типов ламп на высоте 1 м от них (General Electric Company, 1967)

Лампа	Напряжение лампы, Вт	Интенсивность ультрафиолетового излучения на расстоянии 1 м, мкВт/см ²
G4511	4	1
G4T4/1	4	7
G8T5	8	14
G15T8	15	38
G25T8	25	54
G30T8	30	85
G36T6	36	135
G64T6	65	185

стенками лотка, где вода подвергается облучению. Поскольку такой интенсивности облучения будет недостаточно для гибели микроорганизмов, при малой толщине слоя воды эффективность ламп резко снижается. При больших глубинах наблюдается менее эффективное облучение из-за поглощения ультрафиолетовых лучей в верхних слоях воды.

Эффективная обработка достигается, когда вся толща воды облучается с одинаковой интенсивностью в течение всего периода облучения.

Перегородки, установленные поперек направления течения воды (см. рис. 14.8), создают вихревые токи, способствующие более эффективной обработке воды.

Проточность воды в лотке зависит от интенсивности ультрафиолетового облучения, площади, на которой происходит обработка воды, видов микроорганизмов, против которых ведется обработка, и мутности. Дозу облучения (интенсивность, умноженная на время экспозиции) можно определить по таблицам, приведенным выше для каждого вида микроорганизмов, затем следует сделать поправку на мутность воды (увеличивая дозу или предварительно отфильтровав примеси). Максимально допустимую проточность можно определить экспериментально, изменяя проточность в системе при максимальной мутности с учетом времени обработки, необходимой для гибели микроорганизмов, против которых ведется обработка.

Интенсивность облучения, при которой достигается требуемый процент гибели микроорганизмов, определяет максимальный расход воды, который может быть обработан в самом неблагоприятном случае. Такие эксперименты трудоемки и требуют больших материальных затрат, но это самый надежный метод, учитывая опасность, которая может создаться для культивируемых организмов при недостаточном обеззараживании.

После того как доза облучения установлена, можно установить число ультрафиолетовых ламп, необходимых для обеспечения требуемой проточности.

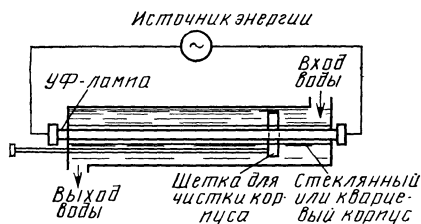


Рис. 14.9. Погружная ультрафиолетовая установка

Погружные установки. На рис. 14.9 показано устройство типичного погружного стерилизатора. Вода поступает в правую часть установки, проходит ее и выходит слева. Ультрафиолетовая лампа монтируется в нижней центральной части цилиндрической камеры и соединяется с источником электроэнергии. Лампа вставляется в кварцевый или стеклянный корпус,

пропускающий ультрафиолетовые лучи. Корпус предохраняет ультрафиолетовую лампу от контакта с водой, но ультрафиолетовые лучи поглощаются водой и микроорганизмами, находящимися в воде. Несмотря на то что установка может работать и без стеклянного корпуса, он предохраняет лампу от действия воды, поэтому ее температура оказывает лишь незначительное влияние на эффективность работы лампы. Находящуюся в корпусе лампу легче заменять. Такое устройство можно непосредственно подключать в напорную систему. Давление в системе зависит только от прочности стеклянного корпуса и качества уплотнений, но не от физической мощности ультрафиолетовой лампы.

Биологическая пленка, образующаяся на внешней поверхности корпуса лампы и снижающая проникающую способность ультрафиолетовых лучей, удаляется ручной щеткой (рис. 14.9). Очистка трубки проводится периодически, по мере необходимости, особенно в небольших установках. Чем крупнее установка, тем эта процедура более трудоемка, поэтому в больших установках (и в некоторых небольших) используют специальный блок для чистки трубки, подобный изображенному на рис. 14.9 и устроенный так, что поток воды, проходящий через установку, перемещает щетку вперед и назад. Такая автоматическая система чистки корпуса снижает затраты труда и предохраняет лампу от повреждения.

В погружных установках используется вся энергия ламп, за исключением небольших потерь при прохождении ультрафиолетовых лучей через стекло и на отражение. Такие установки не нуждаются в отражателях и их монтируют непосредственно в линии под давлением. Поверхностные установки нельзя непосредственно включать в линию под давлением; для увеличения эффективности им необходимы отражатели, и, кроме того, они не допускают автоматической чистки ламп, поэтому на практике чаще всего применяют погружные лампы. Подвесные лампы обычно применяют в лабораторных условиях и для небольших аквариумов.

Методика расчета установок для обработки воды ультрафиолетовыми лучами.

1. Определяют дозу ультрафиолетового облучения, необходимую для обезвреживания микроорганизмов, против которых ведется обработка воды.

2. Вносят поправку в дозу облучения с учетом мутности воды, если она значительная.

3. Определяют необходимую проточность воды при обработке.

4. На основании данных завода-изготовителя об интенсивности излучения ламп и характеристик отражателя для поверхностных установок определяют:

а) толщину слоя воды, необходимую для достижения 90 %-ной или более проницаемости ультрафиолетовых лучей по уравнению (14.18);

б) число ламп и площадь, занимаемую подвесной установкой, а также тип ламп, необходимых для получения требуемой дозы облучения при определенной проточности.

5. Устанавливают перегородки для создания турбулентности, которая способствует 90 %-ной проницаемости ультрафиолетовых лучей (для сведения к минимуму поглощения ультрафиолетовых лучей перегородками, их лучше располагать параллельно оси лампы. Однако требования турбулентности иногда могут диктовать иное расположение перегородок).

ОЗОНИРОВАНИЕ

Обеззараживающие свойства озона были открыты в 1782 г. (Phillips and Hanel, 1960). Первая попытка стерилизации воды озоном была предпринята в 1893 г., а для дезинфекции городской воды озон был впервые применен в 1906 г. в Ницце (Франция).

С этого времени озон широко использовался в Европе для дезинфекции воды, а в США до последнего времени этому вопросу уделяли недостаточно внимания, поскольку считали, что экономичнее воду хлорировать.

Озон — трехатомная молекула кислорода — образуется при разложении возбужденной молекулы кислорода на атомы. Сталкиваясь, атомы кислорода образуют озон. Возбуждение молекул кислорода и образование озона может происходить при пропускании кислорода вблизи короны разряда, создающегося при высоком напряжении или при облучении кислорода ультрафиолетовыми лучами в диапазоне волн от 1000 до 2000 Å (Klein et al., 1975; Koller, 1965). Почти во всех озонаторах промышленного типа используется ток высокого напряжения.

Существует несколько типов промышленных установок для получения озона. В основном они состоят из двух пластин, расположенных на некотором расстоянии одна от другой. Между пластинами пропускается ток высокого напряжения. Обычно пространство между пластинами заполняют воздухом или чистым кислородом, при этом молекулы кислорода возбуждаются до такого состояния, чтобы образовался озон. Получение озона в этих установках зависит от нескольких факторов. Площадь между пластинами, так называемый воздушный зазор, должен быть такой, чтобы сво-

бодный газ поступал постоянно с одинаковой скоростью, но не настолько быстро, чтобы возникла необходимость подачи дополнительного напряжения. Давление газа в установке должно быть достаточным для того, чтобы газ проходил через контактную камеру с заданной скоростью и компенсировал потери давления в генераторе. При увеличении давления газа его электрическое сопротивление меняется, что приводит к необходимости изменения величины воздушного зазора и оптимального напряжения. Скорость разложения озона до молекулярного кислорода зависит от температуры, быстро возрастая с ее увеличением. Учитывая, что 90 % энергии, подаваемой в озонатор, теряется на нагрев, важное значение приобретает охлаждение озонатора (Klein et al., 1975). Для охлаждения озонатора используют воду или воздух в зависимости от конструкции озонатора. Диэлектрик, помещаемый между пластинами, должен иметь высокое электрическое сопротивление и высокую теплопроводность. Эти два свойства одного и того же материала редко встречаются вместе, поэтому принимают компромиссное решение: используют диэлектрик с высоким электрическим сопротивлением, но очень тонкий, чтобы увеличить теплопроводность.

Напряжение электрического тока, используемого в озонаторе, зависит от размера трансформатора и требований, предъявляемых к озонатору. Повышенная частота обеспечивает более высокую эффективность озонатора, но она связана со значительными электрическими потерями. Однако разработанные в последнее время твердые материалы снижают электрические потери при высокой частоте тока.

В качестве исходного газа в озонаторах используется воздух или кислород. Если в качестве газа используется чистый кислород, то для получения одинакового количества озона один и тот же озонатор потребляет вдвое меньше мощности. Однако кислород довольно дорог. Тем не менее, даже учитывая разную стоимость воздуха и кислорода, иногда экономичнее использовать чистый кислород, а не воздух, особенно в крупных установках. Независимо от вида используемого газа он должен быть сухим. Озон — такой сильный окислитель, что сам по себе вызывает коррозию, а в смеси с влажным воздухом процессы коррозии идут еще интенсивнее. Для небольших озонаторов (т. е. таких, которые используются для домашних аквариумов) дешевле чаще менять сами озонаторы, чем высушивать внутренний воздух.

Скорость потока газа определяет концентрацию озона на выходе озонатора: чем меньше скорость потока, тем больше концентрация озона. Большинство конструкций озонаторов обеспечивают концентрацию озона от 0,5 до 10 % по весу (Klein, 1975). Однако при увеличении концентрации озона эффективность их работы быстро падает.

Эффективность озона как обеззараживающего средства. Эффективность озона как бактерицидного средства зависит от времени контакта и дозы. Озон действует

быстрее других дезинфицирующих средств, например хлора, по многим причинам. Хлор должен сначала диссоциировать в воде, а затем становится токсичным, а озон, вступая в контакт с водой, сразу же становится токсичным. Эффективность озона гораздо меньше зависит от pH и температуры, чем хлора, хотя очевидно, что эффективность действия озона выше при pH 6, чем при pH 8 (Leiguarda et al., 1949; Smith and Bodkin, 1944). Озон в отличие от хлора почти не вступает в реакцию с аммиаком (Nebel et al., 1975). Это также способствует более быстрому воздействию на воду озона, чем хлора. Как окислитель озон вдвое сильнее хлора.

Небель и др. (1975) показали, что в городских сточных водах после вторичной обработки логарифм количества бактерий в чашках Петри связан почти линейной зависимостью с концентрацией озона в диапазоне от 0,5 до 10 мг/л. Одновременно в этом же опыте БПК, ХПК, содержание аммиака, нитритов, взвешенных твердых веществ, мутность и цветность уменьшились при возрастании концентрации озона. С увеличением концентрации озона содержание нитратов возрастало. Павони с сотрудниками (Pavoni et al., 1975) рассчитал концентрацию бактерий и вирусов в зависимости от времени контакта с озоном как для смеси бактерий и вирусов, так и отдельно для бактерий и вирусов в дистиллированной воде. Концентрация озона в системе составляла 15 мг/л. Полученные результаты показывают, что выживаемость бактерий и вирусов в зависимости от времени описывается S-образной кривой. Полное обеззараживание завершилось за 15 с при начальной численности бактерий, равной $2 \cdot 10^6$ кл./мл. Численность вирусов снизилась с 10^9 кл./мл практически до нуля в течение 15 с при обработке воды озоном в концентрации 15 мг/л.

Павони и др. (1975) показали, что при обработке воды озоном гибель бактерий и вирусов наступает очень быстро. Многие другие исследователи получили примерно такие же результаты. Келли (Kelly, 1974) сделал обзор 18 работ, в которых исследовалось влияние озона на *E. coli* и другие коли-формы, полиовирус, коксаки-вирус, бактериофаги T-2 и F-2, *Entamoeba histolytica* или *Schistosoma manoni*. В описанных исследованиях воду обрабатывали озоном в течение 1—22 мин (за исключением двух случаев, когда время обработки составляло менее 5 мин), концентрация остаточного озона составляла от 0,05 до примерно 1,8 мг/л. Самая низкая смертность микроорганизмов составила 95 % и почти во всех опытах была достигнута 99 %-ная смертность.

Органические вещества, находящиеся в воде, также следует обрабатывать озоном. Озон широко применяют (особенно в Европе) для обесцвечивания, удаления запаха и снижения мутности городских и сточных вод. Для достижения одинаковой степени обеззараживания воду, содержащую органические вещества, необходимо обрабатывать большими дозами озона, чем воду, не содержащую органических веществ. Озон очень быстро вступает в реакцию с органическими веществами (Bailey, 1975). Озон окис-

ляет олефины и множественные углерод-углеродные связи в ацетилене, ароматических, карбоциклических и гетероциклических молекулах; может окислять также углерод — азотные связи и подобные ненасыщенные группы; нуклеофильные молекулы, такие, как амины, сульфиды и сульфоксиды, фосфины и фосфиты; углерод — водородные связи в спиртах, эфирах, альдегидах, аминах и углеводородах; кремний — углеродные, кремний — кремниевые и кремний — водородные связи; а также различные типы связей углерода с металлами (Bailey, 1975).

Неорганические вещества также потребляют озон. Например, хорошо известно, что под действием озона железо и марганец могут легко окисляться до нерастворимых оксидов. Къезу с соавторами (Kjos et al., 1975) удалось с помощью озона снизить концентрацию железа в пресной воде с 9,54 до 0,07 мг/л. Если вместо озона использовать кислород, концентрацию железа можно снизить до 3,99 мг/л. Концентрацию марганца можно снизить с 1,21 до 0,71 мг/л с помощью кислорода и до 0,05 мг/л с помощью озона. Однако в замкнутых циркуляционных системах с морской водой озон следует применять очень осторожно, поскольку некоторые необходимые соли могут окислиться до нерастворимых соединений и далее в циркуляции не участвовать. Спотт (Spotte, 1970) также указывает на эту опасность.

Токсичность озона. Сам по себе озон токсичен для водных животных и человека. Для человека озон смертелен при концентрации 11000 мг/л и экспозиции 0,1 мин или при концентрации 20 мг/л и экспозиции 1000 мин. Токсичность озона для человека возникает при концентрации 3000 мг/л и экспозиции 0,1 мин или 4 мг/л и экспозиции 1000 мин (Nebel et al., 1975). По токсичности озона для водных животных таких точных данных нет, за исключением очень разрозненных сведений, которые нельзя считать достоверными. Однако вполне очевидно, что любые измеряемые количества озона, присутствующие в системах для культивирования водных животных, являются опасными, и их следует избегать. Например, Артур и Маунт (Arthur and Mount, 1975) установили, что 0,2—0,3 мг/л озона летальны для гольяна. К счастью, озон очень нестойкий и быстро разлагается до молекулярного кислорода, поэтому между озонированием и пуском воды в замкнутую систему должно пройти несколько минут. Однако Деманш и др. (De-Manche et al., 1976) установили, что личинки устриц погибают в озонированной воде даже после ее выдерживания в течение 4 недель; барботировании воздуха через озонированную воду в течение недели, вакуум-фильтрации через фильтр с размером пор 0,8 мкм и добавлении 20 мг/л натриевой соли ЭДТА* в озонированную морскую воду. Однако фильтрация озонированной морской воды через колонку, заполненную порошкообразным ак-

* Динатриевая соль этилендиаминтетрауксусной кислоты в отечественной литературе встречается под торговым названием Трилон-Б. Уменьшает жесткость воды. *Прим. ред.*

тивным углем, полученным из скорлупы кокосовых орехов, делала воду нетоксичной для личинок устриц. Озонированная морская вода после фильтрации через активный уголь обладала бактерицидными свойствами (Blogoslawski et. al., 1975). Эти исследования были выполнены в лаборатории Национальной службы морского рыболовства в Милфорде (штат Коннектикут). Исследования также показали, что обработанная озоном вода нетоксична для здоровых эмбрионов и личинок американской устрицы *Crassostrea virginica*. Были проверены на токсичность и некоторые другие морские организмы, но отрицательного влияния на них озона не обнаружено. Блогославский с соавторами (Blogoslawski et al., 1975) установили также, что озон деактивирует токсичные вещества, выделяемые водорослями *Gymnodinium breve*, *Gonyaulax catenella* и *Gonyaulax tamarensis*, появляющимися во время красного прилива. Сандер и Розенталь (Sander and Rosenthal, 1975) подтвердили, что озонированную воду перед подачей в замкнутую циркуляционную систему следует пропускать через активный уголь.

Конструкции систем для озонаторов. Во всех устройствах для озонирования воды предусмотрен тесный контакт между озоном и болезнетворными микроорганизмами, поэтому основным условием в этих установках является смешивание воды с озоном. Сталь (Stahl, 1975) классифицирует все смесители воды с озоном на четыре группы: душирующие (жидкость диспергирована в газ); с подачей воды и газа через диффузионные колонки; душирующие с барботажем через колонки или через специальные сита; установки для диспергирования газа в жидкости.

С помощью душирующих установок мелкие капли воды попадают в газовую камеру. Таким образом обеспечивается тесный контакт, необходимый для насыщения воды газом, но при этом следует строго соблюдать правильное соотношение между газом и жидкостью. Учитывая это обстоятельство, а также нестабильность озона, использование душирующих установок в качестве озонаторов имеет ограниченное применение.

Диффузионные колонки заполняются гранулированным материалом, через который пропускаются газ и вода. Гранулы увеличивают площадь, через которую проходит газ. Обычный капальный фильтр, применяемый при обработке сточных вод, представляет собой диффузионную колонку. Колонки могут быть прямоточными или противоточными.

Применение диффузионных колонок в качестве озонаторов имеет ряд преимуществ. Они сравнительно малогабаритны, допускают регулирование соотношения газа и жидкости, падение давления через слой невелико и в них можно обрабатывать жидкости, образующие много пены. Кроме того, диффузионные колонки можно устанавливать в линиях, находящихся под давлением. К основным недостаткам колонок относятся: нерегулярная подача газа и жидкости и возможность засорения пор гранулированного материала твердыми веществами, содержащимися в воде.

Пластинчатые установки для барботирования через колонку или систему сит, обычно применяемые в крупногабаритных системах, состоят из одной или нескольких пластин или сит, через которые пропускается газ. Жидкость проходит над пластинами или через них и контактирует с газом. Рабочие характеристики этих установок сходны с характеристиками диффузионных колонок, за исключением того, что в последних исключается вероятность неравномерного распределения газа и жидкости по колонке. Кроме того, у пластинчатых установок рабочий диапазон шире, чем у диффузионных колонок. Периодическое удаление твердых веществ производится в этих колонках также без особых затруднений (Stahl, 1975).

Самый простой способ диспергирования газа в жидкости — пропускание пузырьков газа через столб жидкости. Этот принцип широко используется для озонирования. Поскольку массоперенос возрастает с увеличением площади соприкосновения газа и жидкости, мелкие пузырьки предпочтительнее, поэтому газ обычно подают в нижнюю часть колонки или резервуара через специальную насадку, обеспечивающую мелкие пузырьки. Обычно для этой цели используют керамические, карборундовые, пластиковые и аналогичные пористые материалы с необходимым размером и формой пор, обеспечивающих дисперсию газа в жидкости, находящейся в колонке. Для озонирования воды также можно использовать эжекторы.

Выбор типа озонатора зависит от его назначения, проточности и других параметров системы. Однако главное — обеспечить максимальный контакт между болезнетворными организмами и озоном, что достигается при наибольшей площади поверхности между газом и жидкостью. Большое значение для достижения максимального эффекта обеззараживания имеет также время контакта. В целях экономии при использовании чистого кислорода в озонаторе весьма целесообразно повторное использование кислорода, выходящего из смесителя.

Необходимое время контакта и концентрация озона зависят от вида патогенных организмов и качества воды. При обработке городских сточных вод остаточная концентрация озона на выходе из озонатора составляет 0,5 мг/л, а время контакта — 5—10 мин для достижения 99 %-ного обеззараживания. Для воды, используемой в системах культивирования, содержание органических веществ и химическое потребление озона неорганическими веществами может быть ниже, чем в сточных водах. Блогославский и др. (1975) установили, что полное обеззараживание морской воды в лабораторных условиях достигается при концентрации озона 0,56 мг/л. Время контакта не указано. Учитывая время гибели различных бактерий и вирусов (Katzenelson and Shuval, 1975; Kelly, 1974; Smith and Bodkin, 1944, Sproul and Majumdar, 1975) вполне вероятно, что при обработке воды в течение 1—5 мин концентрация озона равная 0,56—1,0 мг/л, достаточна для большинства систем культивирования водных организмов. Однако единст-

венно надежным методом определения необходимой дозы озона и времени обработки воды является проведение экспериментов на месте. Следует также отметить, что концентрацию озона точно определить трудно, поэтому в одной и той же пробе воды концентрации озона, определенные различными методами, могут быть неодинаковыми.

Сравнение различных методов обеззараживания воды. Нагревание воды с целью обеззараживания — эффективный способ уничтожения болезнетворных организмов или токсических веществ. Однако этот метод настолько дорогой, что в большинстве случаев его применение нерентабельно.

Обработка воды хлором или двумя другими галогенами — бромом и иодом — весьма эффективно действует на бактерии, но для уничтожения вирусов требуется довольно много времени (20—30 мин и более). Хлор в присутствии органических веществ образует хлорамины. Как хлорамины, так и газообразный хлор весьма токсичны для большинства водных организмов. Хлор — газ можно удалить с помощью аэрации. Адсорбцией углем можно удалить и газ, и хлорамины, но это вызывает необходимость дополнительных капитальных затрат и постоянного обслуживания. При дезинфекции хлором необходимы дозаторы и устройство для перемешивания. Хлор — взрывчатое и коррозионно-активное вещество, поэтому при работе с ним необходимо соблюдать определенные меры предосторожности.

Озон как обеззараживающее средство вдвое эффективнее хлора. Он убивает как бактерии, так и вирусы с одинаковой эффективностью и скоростью. Доза и время обработки меньше, чем для хлора, для получения одинаковых результатов. Озон необходимо получать на месте, поскольку он нестойкий и не переносит транспортировки. Озонаторы малоэффективны при получении озона из воздуха с помощью электрического разряда. На получение 1 % озона из воздуха обычно затрачивается 4,5—5 % энергии. Эффективность озонатора увеличивается вдвое, если вместо воздуха использовать кислород (Klein et al., 1975), и уменьшается с увеличением выхода озона. Органические и неорганические вещества, содержащиеся в воде, поглощают озон. Остаточные концентрации озона в отработанной воде не столь опасны, как хлораминов (хотя по этому вопросу единого мнения у ученых нет). Озон превращается в безвредный кислород. Тем не менее есть указания на то, что озонированная вода нуждается в дополнительной обработке активным углем перед подачей в системы для культивирования устриц. Поскольку поэтому вопросу имеется лишь ограниченная информация, вполне вероятно, что и другие организмы могут оказаться чувствительными к озону. В настоящее время озон дороже хлора.

Ультрафиолетовое облучение — эффективное средство обеззараживания воды, если мутность ее находится в допустимых пределах. Более того, ультрафиолетовые лучи не образуют токсических остатков в воде, стерилизаторы просты в работе. Для боль-

ших промышленных установок экономических расчетов пока нет. В лабораторных условиях и для небольших аквариумов ультрафиолетовое облучение весьма эффективно. Уход за УФ-стерилизаторами минимальный, периодически необходимо менять лампы. Стоимость замены ультрафиолетовых ламп, так же как и обычных электрических, сравнима со стоимостью химических веществ, расходуемых при дезинфекции воды хлором, и стоимостью электрического оборудования для получения озона.

REFERENCES

Atlantic Ultraviolet Corporation (1972). Sanitron Ultraviolet Water Purifiers, Form No 200. Long Island city. New York.

Arthur, John W. and Donald I. Mount (1975). Toxicity of a Disinfected Effluent to Aquatic Life, in First International Symposium on Ozone in Water and Wastewater Treatment. International Ozone Institute, Waterbury, Conn., pp. 778—786.

Bailey, Philip S. (1975). Reactivity of Ozone with Various Organic Functional Groups Important to Water Purification, in First International Symposium on Ozone for Water and Wastewater Treatment. International Ozone Institute, Waterbury, Conn., pp. 101—119.

Blogoslawski, W. J., C. Brown, E. W. Rhodes, and M. Broadhurst (1975). Ozone Disinfection of a Seawater Supply System, in First International Symposium on Ozone in Water and Wastewater Treatment. International Ozone Institute, Waterbury, Conn., pp. 674—687.

Coventry, F. L., V. E. Shelford, and L. F. Miller (1935). The Conditioning of a Chloramine Treated Water Supply for Biological Purposes, *Ecology* 16: 60—66.

Culp, Gordon (1974). Breakpoint Chlorination, in Physical—Chemical Nitrogen Removal: Wastewater Treatment. Technology Transfer Seminar Publication, U.S. Environmental Protection Agency. Washington, D.C., pp. 17—20.

Culp, Gordon L., and Russell L. Culp (1974). Disinfection, in New Concepts in Water Purification, G. L. Culp and R. L., Culp, Eds. Van Nostrand Reinhold, New York, pp. 196—204.

DeManche, J. M., P. L. Donaghay, W. P. Breese, and L. F. Small (1976). Residual Toxicity of Oxonized Seawater to Oyster Larvae. Publication No. ORESU-T-003. Sea Grant College Program, Oregon State University, Corvallis.

Downs, A. and T. P. Blunt (1878). Research on the Effects of Light upon Bacteria and Other Organisms. *Proceedings of the Royal Society of London* 26: 488.

Fair, Gordan Maskew, John Charles Geyer, and Daniel Alexander Okun (1968). *Water and Wastewater Engineering. Vol. 2, Water Purification and Wastewater Treatment and Disposal.* Wiley, New York.

Furfari, Santo A. (1966). Depuration Plant Design. U.S. Public Health Service, Division of Environmental Engineering and Food Protection, Washington, D. C.

General Electric Company (1953). Bulletin LD 14, General Electric Division, Lamp Department, Cleveland.

General Electric Company (1967). Germicidal Lamps. Large Lamp Department Publication TP—122, Cleveland.

Hann, Victor A. (1956). Disinfection of Drinking Water with Ozone. *Journal of the American Water Works Association* 48 (10): 1316—1320.

Harris, Weldon C. (1972). Ozone Disinfection. *Journal of the American Water Works Association* 64 (3): 182—183.

Hill, W. F., Jr., F. E. Hamblet, and E. W. Akin (1967). Survival of Poliovirus in Flowing Turbid Seawater Treated with Ultraviolet light. *Applied Microbiology* 15 (3): 533—536.

Hill, William F., Elmer W. Akin, William H. Benton, and Frederick E. Hamblet (1971). Viral Disinfection of Estuarine Water by UV. *Journal of the Sanitary*

Engineering Division. Proceedings of the American Society of Civil Engineers 97 (SA5): 601—615.

Jones, J. R. Erichsen (1964). Fish and River Pollution. Butterworths, London.

Katzenelson, E. and H. I. Shuval (1975). Studies on the Disinfection of Water by Ozone: Viruses and Bacteria, in First International Symposium on Ozone for Water and Wastewater Treatment. International Ozone Institute, Waterbury, Conn., pp. 296—316.

Kelly, C. B. (1961). Disinfection of Sea Water by Ultraviolet Radiation. American Journal of Public Health 51 (11): 1670—1680.

Kelly, C. B. (1965). Disinfection of Sea Water by Ultraviolet Radiation, Second Reproduction. Research Department, Salt Water Fisheries Division, Florida Board of Conservation, Tallahassee, 12 pp.

Kelly, Cornelius B. (1974). The Toxicity of Chlorinated Waste Effluents to Fish and Considerations of Alternative Processes for the Disinfection of Waste Effluents. Virginia State Water Control Board.

Kinman, Riley N. (1972). Ozone in Water Disinfection, in Ozone in Water and Wastewater Treatment. Ann Arbor Science Publishers, Ann Arbor, Mich., pp. 123—144.

Kjos, D. J., R. R. Furgason, and L. L. Edwards (1975). Ozone Treatment of Potable Water to Remove Iron and Manganese: Preliminary Pilot Results and Economic Evaluation, in First International Symposium on Ozone for Water and Wastewater Treatment, International Ozone Institute, Waterbury, Conn., pp. 194—203.

Klein, Morton J., Robert I. Braberts, and Layton C. Kinney (1975). Generation of Ozone, in First International Symposium on Ozone for Water and Wastewater Treatment. International Ozone Institute, Waterbury, Conn., pp. 1—9.

Koller, Lewis R. (1965). Ultraviolet Radiation. 2nd ed. Wiley, New York. 312 pp.

Kothandaraman, V. and Ralph I. Evana (1974). Design and Performance of Chlorine Contact Tanks, Circular 119. Department of Registration and Education, State of Illinois; Springfield.

Leiguarda, R. H., O. A. Peso, and A. Z. R. Palazzola (1949). Bactericidal Action of Ozone. Anales de la Asociacion Quimica Argentina 37: 165—176. Original not available; abstracted in Water Pollution Abstracts 22 (12): 268.

Liu, O. C., F. McGowan et al. (1971). Effect of Chlorination on Human Enteric Viruses in Partially Treated Water from the Potomac River Estuary. Water Supply Programs Division, U.S. Environmental Protection Agency, Washington, D. C.

Luckiesh, Matthew and L. L. Holladay (1944). Disinfecting Water by Means of Germicidal Lamps. General Electric Review 47 (4): 45—50.

Luckiesh, Matthew, G. P. Kerr, Jr., and Thomas Knowles (1947). Killing Bacteria in Water Under Pressure. General Electric Review 50 (5): 16—21.

Nebel, C., P. C. Unangst, and R. D. Gottschling (1975). Ozone Disinfection of Secondary Effluents: Laboratory Studies, in First International Symposium on Ozone for Water and Wastewater Treatment International Ozone Institute, Waterbury, Conn., pp. 383—404.

Pavoni, J. L. M. E. Tittlebaum, H. T. Spencer, and M. R. Fleisman (1975). Ozonation as a Viral Disinfection Technique in Wastewater Treatment Systems, in First International Symposium on Ozone for Water and Wastewater Treatment. International Ozone Institute, Waterbury, Conn., pp. 340—366.

Phillips, G. Briggs and Everett Hanel, Jr. (1960). Use of Ultraviolet Radiation in Microbiological Laboratories. Technical Report BL. 28. Revision of Special Report 211. U.S. Army Chemical Corps. Biological Laboratories, Fort Detrick, Md.

Presnell, Maynard W. and Joseph M. Cummings (1972). Effectiveness of Ultraviolet Radiation Units in the Bactericidal Treatment of Seawater. Water Research 6: 1203—1212.

Rich, Linvil G. (1963). Disinfection, in Unit Processes of Sanitary Engineering. L. G. Rich, Ed. Wiley, New York. pp. 147—164.

Ricks, Henry C., J. R. Cortelyow, Thaddeus D. Labecki, M. A. McWhinnie, Felix J. Underwood, J. E. Semrad, and Gordon R. Reeves (1955). Practical Application

of Ultraviolet Radiation in Purification of Naturally Contaminated Water. American Journal of Public Health 45 (10): 1275—1281.

Sander, E. and H. Rosenthal (1975). Application of Ozone in Water Treatment for Home Aquaria, Public Aquaria and for Aquaculture Purposes, in Aquatic Applications of Ozone, W. J. Blogoslawski and R. G. Rice, Eds. International Ozone Institute, Syracuse, N. Y., pp. 103—114.

Smith, Winslow Whitney and Reichard E. Bodkin (1944). The Influence of Hydrogen Ion Concentration on the Bactericidal Action of Ozone and Chlorine, Journal of Bacteriology 47: 445.

Spotte, Stephen (1970). Fish and Invertebrate Culture: Waste Management in Closed Systems. Wiley-Interscience, New York.

Sproul, Otis J. and Somendu B. Majumbar (1975). Poliovirus Inactivation with Ozone in Water, in First International Symposium on Ozone for Water and Wastewater Treatment. International Ozone Institute, Waterbury, Conn., pp. 288—295.

Stahl, David E. (1975). Ozone Contacting Systems, in First International Symposium on Ozone for Water and Wastewater Treatment. International Ozone Institute, Waterbury, Conn., pp. 40—55.

Ultra Dynamics Corporation (1971). Ultraviolet Water Purifiers: Commercial, Industrial and Municipal Models. Paterson, N. J. 6pp.

Venosa, Albert D. (1972). Ozone as a Water and Wastewater Disinfectant: A Literature Review, in Ozone in Water and Wastewater Treatment. Ann Arbor Science Publishers, Ann Arbor, Mich., pp. 83—100.

Ward, H. M. (1893). The Action of Light on Bacteria. Proceedings of the Royal Society of London 54: 472.

Zillich, John A. (1972). Toxicity of Combined Chlorine Residuals to Freshwater Fish. Journal of the Water Pollution Control Federation 44(2): 212—220.

Глава 15. АЭРАЦИЯ

Аэрация — насыщение воды воздухом или кислородом — очень важный процесс в рыбоводстве и рыболовстве. Гидробионты, представляющие промышленный или спортивный интерес, потребляют кислород; даже фотосинтезирующие растения в темноте потребляют кислород. За исключением периодов высокой фотосинтезирующей активности водорослей, кислород поступает в воду из воздуха. В этой главе рассмотрены факторы, влияющие на перенос кислорода и условия, в которых осуществляется этот перенос.

ГАЗООБМЕН

Переход кислорода в воду можно рассматривать как трехэтапный процесс: переход газообразного кислорода на границу раздела сред газ — жидкость, переход через границу раздела газ — жидкость и переход кислорода с поверхности раздела в жидкость. На первом этапе (рис. 15.1) газообмен происходит за счет процессов диффузии и конвекции и осуществляется сравнительно быстро. Переход через пограничный слой часто относят к процессам, происходящим в поверхностной очень тонкой пленке воды. Однако этот процесс чисто диффузионный. Диффузия кислорода в воде происходит сравнительно медленно. Ламинарное течение способствует образованию пленки значительной толщины. Диффузия через поверхностную пленку происходит с ограниченной скоростью при

ламинарном течении или без течения (в неподвижном состоянии). Третий этап — это перенос кислорода в жидкость. Поскольку диффузия кислорода в воде происходит медленно, этот процесс осуществляется главным образом за счет конвекции.

Переход кислорода в воду зависит от площади поверхности, а также от градиента концентрации кислорода, коэффициента жидкостной пленки и турбулентности:

$$\frac{dC}{dt} = K_L \left(\frac{A}{V} \right) (C_s - C), \quad (15.1)$$

где dC/dt — скорость изменения концентрации кислорода со временем, мг/(л·ч); K_L — коэффициент переноса кислорода, см/ч; A — площадь контакта газа и жидкости, см²; V — объем воды, см³; C_s — концентрация насыщения кислородом жидкости, мг/л; C — концентрация кислорода в жидкости в любой момент времени, мг/л.

Коэффициент переноса кислорода K_L зависит от скорости диффузии кислорода через жидкостную пленку. Диффузия кислорода через поверхностную пленку воды определяется прежде всего химическими свойствами молекул кислорода и воды. Однако с увеличением температуры скорость диффузии возрастает. Примеси, особенно поверхностно-активных веществ, при концентрациях ниже критических мицеллярных концентраций, уменьшают величину K_L .

Величина A/V в уравнении (15.1) — это отношение площади поверхности к объему аэрируемой жидкости. При увеличении площади поверхности жидкости на единицу объема скорость перехода кислорода также увеличивается, если все остальные параметры остаются постоянными. Иными словами, чем больше площадь поверхности жидкости, тем быстрее происходит перенос кислорода. Часто отношение A/V объединяют с K_L и выражают в виде K_{La} как общую скорость перехода кислорода. Практически в действующей системе аэрации измерить величину K_L очень трудно. Объединив эти параметры и A в общий коэффициент перехода кислорода, можно определить этот коэффициент в работающей системе путем измерения разности концентраций кислорода за какой-либо отрезок времени. Концентрация кислорода легко поддается измерению.

Влияние температуры на K_{La} изучали многие исследователи (Chesness and Stephens, 1971; Echenfelder, 1952; Nusbaum and Miller, 1952). Чеснесс и Стефенс (1971) установили, что K_{La} возрастает на 1,56 % при увеличении температуры воды на один градус. Для приведения величины K_{La} к стандартной температуре 20 °C было выведено следующее уравнение (Аноп, 1972):

$$(K_L a)_{20} = (K_L a)_T 1,024^{(20-T)}, \quad (15.2)$$

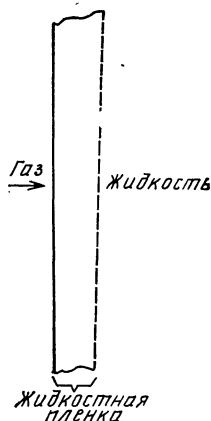


Рис. 15.1. Переход кислорода из газообразного состояния в жидкость

где $(K_{La})_{20}$ — общий коэффициент перехода кислорода при 20°C ; $(K_{La})_T$ — общий коэффициент перехода кислорода при температуре T .

Уравнение (15.2) дает несколько большее процентное увеличение K_{La} на градус Цельсия (около 2,4 %). Эйхенфельдер (Eichenfelder, 1967) приводит величину 1,028, а не 1,024 для константы в уравнении (15.2). Он работал с городскими сточными водами, а Чеснесс и Стефенс (1971) исследовали воду пруда, в котором выращивали сомика-кошку, поэтому уравнение (15.2), очевидно, представляет собой среднее значение между опубликованными данными для поправки K_{La} в зависимости от температуры.

Величина $(C_s - C)$ в уравнении (15.1) — разность между насыщающей и истинной концентрацией в данный момент — определяет градиент, который контролирует скорость перехода кислорода в воду. Концентрация кислорода при насыщении C_s зависит от парциального давления кислорода в окружающей атмосфере, температуры воды и солености. Растворенные органические вещества могут также влиять на величину C_s , но их влияние обычно имеет второстепенное значение в системах для культивирования водных организмов. Поскольку многие из этих органических веществ поверхностно-активные, они могут изменять величину K_L . Возрастание парциального давления кислорода ведет к увеличению C_s . Увеличение концентрации кислорода в газовой фазе, например путем использования чистого кислорода вместо воздуха или увеличения атмосферного давления, также ведет к увеличению C_s . Повышение температуры воды или солености снижают насыщающую концентрацию кислорода (см. табл. 4.1).

Турбулентность или перемешивание воды в системе увеличивает скорость перехода кислорода по двум причинам. Во-первых, турбулентность уменьшает толщину поверхностной пленки, что в свою очередь увеличивает K_L . Во-вторых, при турбулентности новые частицы жидкости выходят на поверхность и соприкасаются с атмосферой. Это ведет к замене диффузии (медленный процесс) конвекцией (быстрый процесс), а также увеличению площади контакта кислорода с жидкостью. Площадь эффективного переноса можно увеличить, распыляя воду на поверхности, как это делают аэраторы, или перемешивая воду, в результате чего нижние слои поднимаются на поверхность.

Интегрируя уравнение (15.1) для граничных условий от C_i до C и от $t=0$ до t , получаем следующие уравнения:

$$\ln \left(\frac{C_s - C}{C_s - C_i} \right) = K_L \frac{A}{V} t; \quad (15.3)$$

$$\ln \left(\frac{C_s - C}{C_s - C_i} \right) = K_L at. \quad (15.4)$$

Если зависимость, выраженную уравнением (15.4), вычертить в полулогарифмическом масштабе, то K_{La} — наклон прямой, ко-

торый и определяет коэффициент переноса кислорода. Таким способом можно определять K_{La} . Разность $(C_s - C_i)$ можно рассматривать как величину начального дефицита кислорода, а $(C_s - C)$ — как величину дефицита кислорода спустя время t . Поскольку эта зависимость логарифмическая, то чем ближе концентрация кислорода к полному насыщению, тем больше времени требуется для растворения кислорода. Это делает непрактичным более чем 95 %-ное насыщение воды кислородом с помощью аэрации, за исключением особых случаев или когда используются специальные аэраторы, позволяющие легко добиваться перенасыщения.

Концентрация кислорода в любой системе для культивирования гидробионтов зависит от скорости поступления и потребления кислорода. Основное количество кислорода в воде расходуется на биологические нужды, поскольку все культивируемые организмы, бактерии в биофильтрах и свободноплавающие бактерии нуждаются в кислороде. Стресс также увеличивает потребность культивируемых организмов в кислороде. В связи с тем, что переход кислорода в значительной степени зависит от градиента его концентрации, Буш (Busch, 1970) установил, что эффективность аэраторов различной конструкции при одинаковых условиях работы весьма сходна. Градиент концентрации обусловлен в основном потреблением кислорода биологическими объектами системы.

ТИПЫ АЭРАТОРОВ

Существуют аэраторы четырех типов: гравитационные, поверхностные, диффузионные и турбинные, а также конструкции, в которых сочетаются различные признаки. Аэраторы используют подводимую энергию для увеличения площади поверхности, через которую переходит кислород, и для перемешивания жидкости. При этом вода с низким содержанием кислорода вступает в контакт с воздухом или газообразным кислородом. При перемешивании увеличивается площадь поверхности, а также градиент концентрации кислорода, по которому происходит перенос кислорода. На многих станциях очистки городских сточных вод аэраторы используются для увеличения скорости потока жидкости в бассейнах и поддержания мелких твердых частиц во взвешенном состоянии. При таком использовании аэраторов потребность в энергии возрастает. Применение аэраторов для обработки городских сточных вод широко освещено в специальной литературе. Однако при культивировании гидробионтов к имеющимся данным следует подходить с осторожностью, поскольку при обработке сточных вод необходимо поддерживать в среде минимальную концентрацию кислорода 1 мг/л, а при культивировании водных организмов концентрация кислорода должна быть не ниже 3 мг/л, а обычно выше.

Гравитационные аэраторы. В гравитационных аэраторах используется энергия, высвобождающаяся при падении воды с высоты для увеличения поверхности контакта воды с воздухом, что

приводит к увеличению в ней содержания кислорода. В природных водотоках течение обеспечивает перемешивание, что увеличивает растворение кислорода. Водопады — очень эффективные природные аэраторы. При падении с высоты вода разбивается на мелкие брызги, что увеличивает площадь поверхностного слоя на несколько порядков. Пороги — еще один распространенный вид природных аэраторов. В данном случае возникает механическое перемешивание и увеличивается турбулентность в результате того, что быстротекущая вода наталкивается на препятствия. Поскольку на этих препятствиях возникает очень сильная турбулентность, то и скорость перехода кислорода в воду высока.

Гравитационные аэраторы, созданные человеком, во многом повторяют природные водотоки. Классическим примером являются плотины. Вода, проходящая через турбину или переливающаяся через плотину, обладает огромной кинетической энергией у ее основания. Эта энергия обычно расходуется на турбулентное перемешивание, что приводит к усилению аэрации. Рыбоходы, хотя и предназначены для других целей, также являются эффективными аэраторами. Хотя основное назначение рыбохода — пропуск рыбы через плотину, конструкция его сходна с конструкцией каскадного аэратора.

Несмотря на то что большинство мероприятий, осуществляемых человеком для улучшения водных систем, усиливает аэрацию, эффект аэрации наблюдается не всегда. Спрямление рек и их углубление снижают турбулентность, что ведет к уменьшению их аэрации. Это только один пример, но он указывает на необходимость учета влияния строительства гидротехнических сооружений на аэрацию.

Гравитационные аэраторы широко используются в различных системах для культивирования водных организмов, поскольку они сравнительно недороги и их легко сделать. Независимо от конструкции аэраторов, эффективность их работы зависит от их способности увеличивать отношение площади поверхности к общему объему воды и турбулентность. Поскольку уровень воды в системах для культивирования часто регулируется высотой стенки, то вода, перемешиваясь и проходя через водосливный порог, аэрируется. На рис. 15.2 показан канал, разделенный на четыре секции: *A*, *B*, *C* и *D*. Уровень воды в каждой секции регулируют водосливные пороги, установленные на выходе из каждой секции. Миниатюрные водопады, образующиеся между секциями при падении воды через водосливный порог, аэрируют воду.

Чеснесс и Стефенс (1971) описали семь типов гравитационных устройств для аэрации, используемых в каналах: водослив со столиком для разбрызгивания воды (рис. 15.3), водослив с лопастным колесом (рис. 15.4), водослив с вращающейся щеткой (рис. 15.5), наклонная рифленая плоскость без отверстий (рис. 15.6), наклонная рифленая плоскость с отверстиями (рис. 15.7), решетчатый аэратор (рис. 15.8), ступенчатый с перфорированными выступами (рис. 15.9).

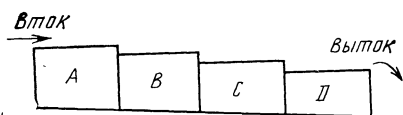


Рис. 15.2. Система каналов для культивирования

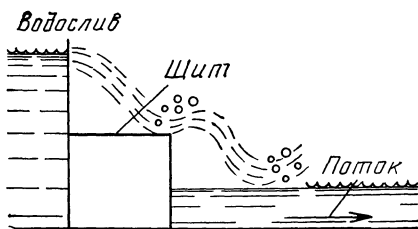


Рис. 15.3. Водослив со столиком для разбрызгивания воды

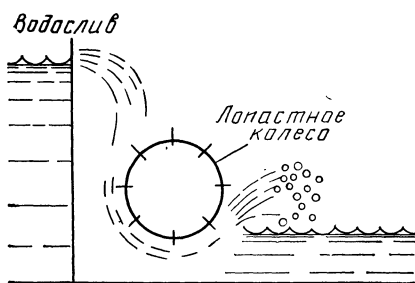


Рис. 15.4. Водослив с лопастным колесом

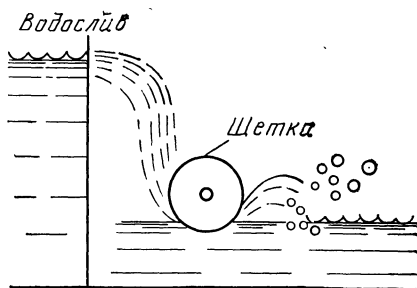


Рис. 15.5. Водослив с вращающейся щеткой

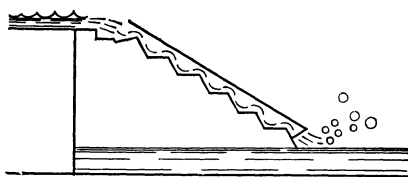


Рис. 15.6. Наклонная рифленая плоскость без отверстий

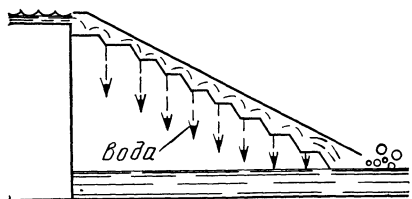


Рис. 15.7. Наклонная рифленая плоскость с отверстиями

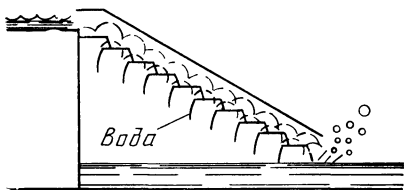


Рис. 15.8. Решетчатый аэратор

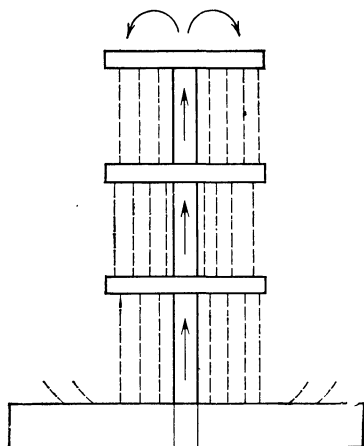


Рис. 15.9. Ступенчатый аэратор с перфорированными выступами

Для определения коэффициента полезного действия и механической эффективности для каждого типа аэратора были предложены следующие уравнения (Chesness and Stephens, 1971):

$$E = 100 \left(\frac{C_b - C_a}{C_s - C_a} \right); \quad (15.5)$$

$$ME = \frac{(C_b - C_a) Q (3,6 \cdot 10^3) e}{Q \gamma h}, \quad (15.6)$$

где E — КПД аэрации, %; C_a — концентрация кислорода до аэратора, мг/л; C_b — концентрация кислорода после аэратора, мг/л; C_s — насыщающая концентрация кислорода при данной температуре, мг/л; ME — механическая эффективность, кг O_2 /(кВт·ч); Q — расход воды, л/с; γ — удельный вес воды, Н/м³; h — высота падения воды, м; e — эффективность работы насоса в десятичных долях.

В экспериментах Чеснесса и Стефенса (1971) расход воды составлял 0,8—3,2 л/с, а перепад высоты — 0,3 или 0,6 м. Осредненные параметры, которые брали для исследований эти авторы, представлены в табл. 15.1. Из таблицы видно, что эффективность аэрации возрастает с увеличением перепада высоты, а механическая эффективность насыщения кислородом уменьшается. Это происходит из-за снижения градиента концентрации кислорода по мере увеличения высоты падения воды. Во время падения с высоты 0,3 м градиент концентрации кислорода в воде приближается к C_s , перед опытом воду в специальном резервуаре обескислороживали химическим путем. При увеличении высоты падения еще на 0,3 м градиент концентрации кислорода снижается на то количество кислорода, которое перешло в воду на первых 0,3 м. Таким образом, эффективность аэрации на единицу перепада высоты уменьшается по мере увеличения высоты падения, поскольку градиент концентрации уменьшается на каждую следующую единицу падения высоты. Это в свою очередь снижает механическую

Таблица 15.1. Средняя эффективность аэрации (E) и механическая эффективность насыщения кислородом (ME) для семи типов аэраторов (Chesness and Stephens, 1971)

Тип аэратора	Перепад высоты 0,3 м		Перепад высоты 0,6 м	
	E , %	ME , кг $O_2/(кВт \times$ $\times ч)$	E , %	ME , кг $O_2/(кВт \times$ $\times ч)$
Водослив со столиком	24,1	1,59	38,0	1,37
Водослив с лопастным колесом	24,2	1,68	39,0	1,23
Водослив с вращающейся щеткой	23,9	1,62	34,9	1,22
НРП* без отверстий	25,3	2,32	43,0	1,43
НРП с отверстиями	30,1	1,89	50,1	1,67
Решетчатый аэратор	34,0	2,27	56,2	1,91
Ступенчатый с перфорированными выступами	31,7	2,05	52,0	1,77

* Наклонная рифленая плоскость.

эффективность насыщения кислородом, так как во втором случае расходуется такое же количество энергии, как и при падении воды с 0,3 м, а поглощение кислорода меньше. То же самое наблюдается при дальнейшем увеличении высоты падения воды.

Ступенчатый аэратор наиболее эффективен при перепаде высоты, равном 0,3 м, а наклонная рифленая поверхность без отверстий имеет наибольшую механическую эффективность насыщения кислородом. При перепаде высоты лестничного аэратора 0,6 м эффективность аэрации и механическая эффективность насыщения кислородом наибольшие. С точки зрения эффективности аэрации и коэффициента полезного действия ступенчатый аэратор — наилучший из всех аэраторов, но построить его труднее, чем ступенчатый с перфорированными выступами. В некоторых случаях простота сооружения может оказаться главным доводом в пользу ступенчатого аэратора с перфорированными выступами, несмотря на небольшие потери в эффективности аэрации и КПД.

Страсбург (Strasburg, 1964) изучал эффективность лоткового аэратора каскадного типа (рис. 15.10). Соленую воду с концентрацией кислорода 0,17—0,69 мг/л (обычно 0,17—0,20 мг/л) из источника подавали насосом в аэратор. Содержание кислорода (в процентах насыщения) на выходе непрерывно регистрировали и строили график его зависимости от расстояния между лотками и числом лотков в аэраторе (рис. 15.11 и 15.12). Несмотря на то что на рис. 15.11 не показаны кривые, полученные для лотков с 9-го до 15-й, они расположены между кривыми для лотков с 8-го по 16-й. При данном расстоянии между лотками насыщенность кислородом с увеличением числа лотков возрастает, но скорость увеличения насыщения кислородом уменьшается. При данном числе лотков с увеличением расстояния между ними насыщение кисло-

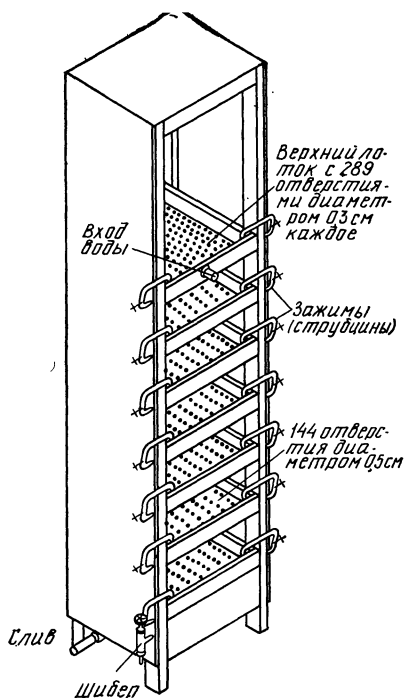


Рис. 15.10. Каскадный аэратор (Strasburg, 1964)



Рис. 15.11. Зависимость насыщения кислородом (в %) от расстояния между лотками и их числом в каскадном аэраторе (Strasburg, 1964)

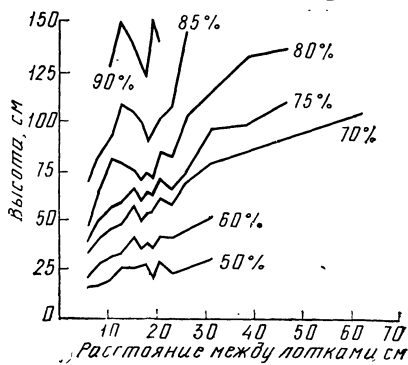


Рис. 15.12. Высота каскадного аэрата, необходимая для получения данного процентного насыщения (Strasburg, 1964)

родом увеличивается, но скорость этого процесса уменьшается. Уменьшение скорости насыщения кислородом происходит из-за логарифмической формы кривой роста концентрации кислорода при приближении к полному насыщению.

На рис. 15.12 показана высота аэратора, необходимая при различном расстоянии между лотками, для достижения требуемого насыщения. Для данной высоты аэратора с увеличением расстояния между лотками насыщение кислородом увеличивается в пределах 70—75 % насыщения. Таким образом, в пределах допустимой высоты аэратора желательно располагать лотки на большем расстоянии друг от друга и увеличивать их число. Обычно расстояние между лотками составляет 10—25 см, а их число — от 4 до 10 в зависимости от требуемого насыщения воды кислородом.

Тebbутт (Tebbutt, 1972) также изучал каскадные аэраторы. В установке, с которой он работал, несколько ступеней были соединены в серию таким образом, что угол наклона всей системы к горизонту составлял 45—36°. Он также изучал гладкую поверхность, расположенную под углом 45° к горизонту. Насыщение кис-

лородом воды, падающей по гладкой поверхности, составляло всего 44 % при расходе 48 м³ на 1 м длины порога в день [в м³/(м·день)], а общий перепад высот составлял 1750 м. При сходных условиях опыта достигалось 36 %-ное насыщение при расходе 132 м³/м в день или 19 %-ное насыщение при расходе 576 м³/м в день. Температура воды в опытах была 15 °С.

Теббутт (1972) сообщает о результатах экспериментов, проведенных со ступенчатым аэратором (высота ступени 50 мм) при общем угле наклона аэратора к горизонту 36°. При общем перепаде высот 1250 м и температуре воды 9 °С 68 %-ное насыщение достигалось при расходе 24 м³/м в день. В тех же условиях при расходах 48,84 и 132 м³/м в день насыщение составляло 54 %. Когда перепад высот на одной ступени был увеличен до 73 мм, а общий наклон установки до 45°, были получены следующие величины насыщения: 65 % при расходе 24 м³/м в день, 58 % при 84 м³/м в день, 60 % при 132 м³/м в день, 58 % — при 288 м³/м в день, 53 % при расходе 576 м³/м в день, 31 % насыщения при 1152 м³/м в день.

Таким образом, было показано, что для каскадных аэраторов увеличение расходов вызывает уменьшение эффективности аэрации. Это объясняется тем, что при фиксированной величине порога увеличение расхода приводит к уменьшению площади поверхности, приходящейся на единицу объема воды. Было показано, что в определенном диапазоне расходов эффективность аэрации изменяется незначительно. При увеличении высоты ступени с 50 до 73 мм насыщение изменяется незначительно. Таким образом, общая высота падения воды в аэраторе оказывает существенное влияние на эффективность аэрации.

$$C_b = 1 - ae^{-bh}, \quad (15.7)$$

где C_b — насыщение кислорода на последней ступени аэратора, %; h — общая высота падения воды в аэраторе, мм; a и b — константы.

Константа a зависит от первоначальной концентрации кислорода в верхней части каскадного аэратора, b — от расхода и других параметров.

Теббутт (1972) пришел к выводу, что каскадный аэратор позволял добиться максимального насыщения воды кислородом при заданном перепаде высот и расходе воды. Он также отметил, что увеличение расходов воды снижает насыщенность воды кислородом на нижней ступени аэратора.

Преимуществом гравитационных аэраторов является то, что в качестве энергии используется сила тяжести. Однако это справедливо только в тех случаях, когда источник воды расположен выше водоема. Если источник водоснабжения расположен ниже водоема, то воду приходится поднимать на определенную высоту насосами и лишь затем использовать гравитационный аэратор. Затраты на перекачивание необходимо включать в общую стоимость системы.

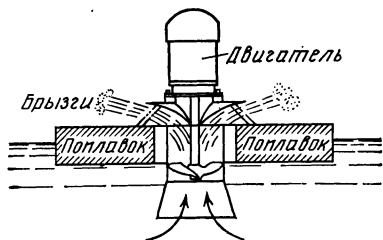


Рис. 15.13. Поверхностный аэратор

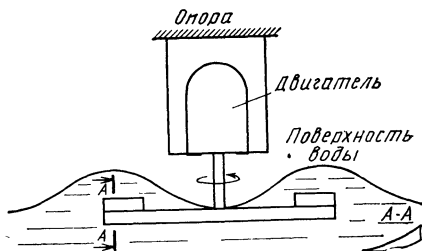


Рис. 15.14. Роторный аэратор пропеллерного типа

Если перепад высот составляет менее 10 м, пересыщение кислородом воды при работе гравитационных аэраторов наблюдается очень редко. Если оно все же происходит, то обмен с атмосферой быстро сводит его на нет. Пересыщение воды, вызываемое некоторыми другими аэраторами, может вызывать газопузырьковую болезнь у гидробионтов.

Поверхностные аэраторы. Поверхностные аэраторы предназначены для перемешивания и приведения в движение поверхностного слоя воды, в результате чего переход кислорода из воздуха в воду интенсифицируется. Фонтан является простейшим поверхностным аэратором. Если вода подается с высокой скоростью через насадку и затем ударяется о водную поверхность, такой вид аэрации называется дождеванием. На рис. 15.13 и 15.14 изображены два механических поверхностных аэратора. На рис. 15.13 вода подается насосом по вертикальной трубе вверх и затем при помощи отражателя разбрызгивается по поверхности воды. На рис. 15.14 показан роторный аэратор пропеллерного типа. Ротор установлен на небольшой глубине. Вращение ротора создает движение на поверхности воды, в результате чего контакт ее с воздухом увеличивается.

Горизонтальные вращающиеся щетки или лопасти, частично погруженные в воду и вращающиеся с высокой частотой, также широко используются в качестве поверхностных аэраторов. Вращение лопастей создает высокую турбулентность. Они превращают воду в капли, которые разбрызгиваются на поверхности.

Рабочие параметры. Скорость насыщения кислородом (кг O_2 в час) зависит от многих факторов: глубины погружения; частоты вращения и диаметра ротора; энергии, приходящейся на единицу площади или объема; свойств аэрируемых стоков; характеристик (форма и размер) емкости; градиента концентрации кислорода и типа аэратора. Скорость насыщения воды кислородом обычно указывается в паспорте аэратора. Эти значения получены при стандартных условиях или приведены к ним. К стандартным условиям относятся следующие: воздух находится в контакте с чистой водой при давлении 760 мм рт. ст., температура воды

составляет 20 °С, исходная концентрация кислорода в воде равна нулю. Размеры и форма емкостей не всегда указываются.

Увеличение глубины погружения, частоты вращения и диаметра ротора поверхностных аэраторов приводит к увеличению скорости насыщения кислородом.

Даунинг и Бун (Downing and Boon, 1963) обнаружили почти линейную зависимость между глубиной погружения ротора в поверхностном аэраторе (конического типа) и абсорбцией кислорода (кг O₂ в час). Стальзер и фон дер Эмд (Stalzer and Von der Emde, 1972) получили сходные результаты при изучении гигантских роторов. Колега и др. (Kolega et al., 1969), работая с лопастными поверхностными аэраторами, обнаружили, что коэффициент перехода кислорода практически линейно зависит от глубины погружения ротора, которая составляла 0,1—0,5 его диаметра. Они также отметили, что при увеличении диаметра лопастей с 0,3 до 0,6 м эффективность насыщения воды кислородом быстро возрастает.

Эйхенфельдер (Echenfelder, 1969) определил оптимальную частоту вращения ротора для конических аэраторов. При частотах вращения выше и ниже оптимальной насыщение кислородом на единицу затрачиваемой мощности снижалось.

Увеличение затрат мощности на единицу объема для всех аэраторов приводит к увеличению насыщения кислородом. Однако существует оптимальная мощность, обеспечивающая максимальную скорость насыщения кислородом. При дальнейшем увеличении мощности приращение скорости насыщения кислородом в единицу времени на единицу затраченной мощности начинает снижаться. Гурвитц и др. (Hurwitz et al., 1963) показали, что насыщение воды кислородом в течение одного часа аэратором конического типа приблизительно описывается следующим уравнением:

$$y = a + bx^2, \quad (15.8)$$

где y — мощность, расходуемая на единицу поглощенного кислорода; x — частота вращения конуса; a и b — константы.

Таким образом, для исследованного аэратора существовала максимально эффективная частота вращения, выраженная в единицах затраченной мощности на единицу поглощенного кислорода.

Чеснесс и др. (1973) изучали аэратор с насадкой в виде форсунки и нашли, что для пресноводной системы механическая эффективность выражается следующим уравнением:

$$ME = \frac{K_L a V C_s \cdot 10^6}{P}, \quad (15.9)$$

где ME — механическая эффективность насыщения кислородом, кг O₂/(кВт·ч); $K_L a$ — суммарный коэффициент поглощения кислорода, ч⁻¹; C_s — насыщающая концентрация, мг/л; V — объем аэрируемой емкости, л; P — мощность, подводимая к форсунке, кВт.

Значение K_{La} получается из следующего уравнения регрессии:

$$K_{La} = \frac{Qv}{1,923}, \quad (15.10)$$

где Q — расход воды, л/с; v — скорость, м/с; K_{La} — суммарный коэффициент поглощения кислорода, ч⁻¹.

Чеснесс и др. (1973) обнаружили, что одна погруженная форсунка, расположенная на расстоянии, равном $\frac{1}{3}$ радиуса от центра бассейна вместимостью 2782 л, и под углом 30° к горизонтали, обеспечивала максимальную аэрацию. Были опробованы также четыре поверхностных форсунки, расположенные под углами 30, 45, 60 и 75° к горизонтали. В табл. 15.2 приведены результаты

Таблица 15.2. Результаты аэрации дождеванием (Chesness et al., 1973)

Расход, л/мин	Давление, кПа	Скорость течения воды, м/с	Диаметр отверстий форсунок, см	K_{La} , ч ⁻¹	ME, кг O ₂ /(кВт·ч)	Расход, л/мин	Давление, кПа	Скорость течения воды, м/с	Диаметр отверстий форсунок, см	K_{La} , ч ⁻¹	ME, кг O ₂ /(кВт·ч)
8,7	34,8	8,17	3,0	0,49	2,1	41,0	69,0	11,40	3,4	4,15	2,2
8,1	69,0	10,85	2,9	0,87	2,4	37,9	137,9	15,73	3,3	5,82	1,7
8,3	137,9	17,50	2,9	1,24	1,6	37,4	206,8	19,63	3,2	6,61	1,3
10,2	206,8	21,49	2,9	2,06	1,5	59,6	34,5	10,24	3,7	2,46	1,8
18,2	34,5	7,56	3,3	0,90	2,2	57,9	69,0	11,52	3,6	6,48	2,5
21,3	69,0	11,22	3,2	2,51	2,6	58,9	137,9	16,37	3,4	7,89	1,5
17,8	137,9	16,58	3,0	3,05	1,9	58,9	206,8	19,81	3,3	10,14	1,3
21,9	206,8	20,45	3,0	5,36	1,8	18,0	138,9	14,94	5,4	2,39	1,5
36,2	34,5	8,44	3,5	1,52	1,9	35,6	137,9	16,61	5,6	4,67	1,5

этих экспериментов. Когда две форсунки заменили одной, количество поглощенного кислорода K_{La} уменьшилось на 14 % при условии, что расход воды через одну форсунку был равен суммарному расходу воды через две форсунки при той же скорости прохождения воды через форсунку. Таким образом, одна крупная форсунка эффективнее двух мелких. Чеснесс и др. (1973) отметили, что для форсунок со скоростью подачи воды выше 10,7 м/с, механическая эффективность насыщения кислородом снижается. Выше этой скорости увеличение коэффициента K_{La} недостаточно для компенсации расхода мощности, необходимой для достижения более высокой скорости. Наиболее эффективной для всех экспериментов была скорость 10—11 м/с.

Характеристики подлежащих аэрации сточных вод также влияют на выбор аэратора. Большинство веществ, содержащихся в сточных водах, несколько снижают концентрацию насыщения

воды. При расчете аэрации бытовых сточных вод коэффициент β принимают равным 0,95—1, а коэффициент α 0,80—0,95.

$$\alpha = \frac{K_L \text{ а сточных вод}}{K_L \text{ а чистой воды}};$$

$$\beta = \frac{\text{концентрация насыщения кислородом сточных вод}}{\text{концентрация насыщения кислородом чистых вод}}.$$

Коэффициенты α и β лучше всего определять экспериментально для конкретных сточных вод. Коэффициенты α и β для сточных вод систем культивирования гидробионтов неизвестны.

На величину коэффициента α существенное влияние оказывает присутствие в воде поверхностно-активных веществ, которые, концентрируясь на поверхности раздела фаз жидкостями — газ, образуют на поверхности жидкости пленку и затрудняют проникновение в нее кислорода. Детергенты — наиболее распространенные активные вещества, обычно содержащиеся в бытовых стоках. В системах для культивирования водных организмов обычно содержатся природные поверхностно-активные вещества, например белки. Они уменьшают поверхностное натяжение жидкости и способствуют образованию мелких капель. Это увеличивает скорость насыщения воды кислородом в поверхностных аэраторах путем увеличения поверхности соприкосновения с воздухом под действием турбулентности. При уменьшении турбулентности поверхностно-активные вещества уменьшают диффузию через пленку и таким образом снижают скорость проникновения кислорода в воду. Форма и размер бассейна также влияют на скорость насыщения воды кислородом. При постоянных размере и числе аэраторов чрезмерное увеличение размера бассейна (в зависимости от типа аэратора и формы бассейна) приводит к уменьшению скорости насыщения воды кислородом. Это связано в основном со снижением скорости движения жидкости и турбулентности в бассейнах, слишком крупных для данного типа аэратора. Для увеличения турбулентности при обработке бытовых сточных вод на очистных станциях Кноп и Кальбскопф (Кноп and Kalbskopf, 1969) рекомендовали поддерживать отношение диаметра бассейна к диаметру зоны работы поверхностного аэратора равным 1,5:1,0.

Потребность аэраторов в энергии обычно рассчитывают как количество затраченной мощности на единицу объема (Echenfelder, 1969). Корманик (Kormanik, 1976) представил данные по затратам мощности на единицу площади поверхности бассейна. Он установил линейную зависимость между насыщением кислородом на единицу подводимой мощности и мощностью, затрачиваемой на единицу поверхности бассейна, отметив при этом, что влияние размеров и форм бассейна на скорость насыщения воды кислородом отражалось более значительно на высокоскоростных малогабаритных аэраторах, чем на низкоскоростных поверхностных аэраторах. Окончательное влияние формы и размеров кон-

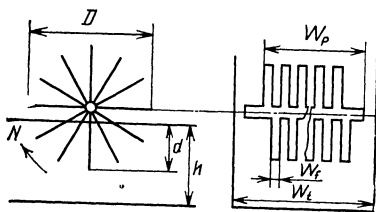


Рис. 15.15. Параметры лопастного аэратора:

D — диаметр лопастного колеса; d — глубина погружения; h — глубина воды; N — частота вращения колеса, об./с; w_p — ширина лопасти; w_r — ширина ротора; w_b — ширина бассейна

кретного бассейна на скорость насыщения воды кислородом зависит от суммы таких факторов, как тип используемого аэратора, его размер, режим течения в бассейне и свойства сточных вод.

Градиент концентрации кислорода, несомненно, влияет на скорость насыщения воды кислородом. Как правило, поверхностные аэраторы обеспечивают поступление в воду от 1,9 до 2,3 кг O_2 /(кВт·ч) (Echenfelder, 1969). Даунинг и Бун (Downing and Boon, 1963) считают, что аэраторы с погружен-

ными в воду щетками дают 1,3—3,5 кг O_2 /кВт·ч). Однако эти значения получены при работе со сточными водами или в стандартных условиях, описанных выше. Системы очистки сточных вод часто работают при низких концентрациях кислорода (0,5—1 мг/л). Это создает гораздо более высокий градиент концентрации кислорода, чем свойственный системам для культивирования гидробионтов где содержание кислорода в воде не должно быть ниже 3—5 мг/л. Таким образом, в системах культивирования из-за низкого градиента концентрации кислорода скорость насыщения воды кислородом ниже.

Конструкция аэратора также влияет на скорость насыщения воды кислородом. Лучше всего сравнивать аэраторы различных конструкций по данным завода-изготовителя. Однако еще более надежные результаты дают полевые испытания аэратора, поскольку в них можно учесть форму бассейнов и особенности сточных вод.

Расчет поверхностного аэратора. Поверхностные аэраторы выпускаются различными фирмами, доставляются в собранном виде и даже устанавливаются по желанию заказчика. Часто приобретение готового аэратора наиболее выгодно. Однако в некоторых случаях желательно иметь собственный аэратор. Часто такие конструкции создаются по методу проб и ошибок, так как информация по этому вопросу довольно ограничена.

Колега с соавторами (Kolega et al., 1969) разработал конструкцию лопастного роторного аэратора (рис. 15.15). Эффективность работы этого аэратора они выразили с помощью коэффициента насыщения кислородом K_{HK} , подобного коэффициенту K_L . При выведении уравнения следующие величины были приняты постоянными: отношение длины аэрируемого бассейна к ширине вращающегося лопастного ротора, отношение ширины аэрируемого бассейна к ширине вращающегося лопастного ротора, отношение ширины лопасти к расстоянию между лопастями, отношение вязкости воздуха к вязкости жидкости, отношение плавучести к силе тяжести, действующей на погруженный в воду пузырек воз-

духа, число Шмидта (т. е. вязкость жидкости, деленная на произведение плотности жидкости на массовую диффузию кислорода в жидкости и на коэффициент инерции из второго закона Ньютона).

$$KHK = 7,42 \cdot 10^7 (N) \left[\left(\frac{d}{D} \right)^{0,86} \left(\frac{W_f}{D} \right)^{0,18} \left(\frac{h}{D} \right)^{-0,28} (Re)^{0,70} (Fr)^{-0,19} \right]^*, \quad (15.11)$$

где KHK — суммарный коэффициент насыщения кислородом, c^{-1} ; N — частота вращения барабана, об/с; d — глубина погружения лопасти, футы; D — диаметр лопастного колеса, футы; h — глубина воды в бассейне, футы; W_f — ширина лопасти, футы; Re — число Рейнольдса $NeND^2/\mu_1$; Fr — число Фруда $NeDN^2/g$; Ne — коэффициент инерции по второму закону Ньютона, фунт силы $\cdot c^2 / (\text{фунт массы} \cdot \text{фут})$; μ_1 — абсолютная вязкость жидкости, фунт силы $\cdot c / \text{фут}^2$; g — ускорение свободного падения, фунт силы/фунт массы.

Колега и др. (Kolega et al., 1969) установили, что коэффициент корреляции для уравнения (15.11) равен 0,983—0,996.

Применив горизонтальный ротор, Стальзер и фон дер Эмд (Stalzer and Von der Emde, 1972) установили, что с глубиной погружения ротора потребляемая мощность линейно возрастает. Они также обнаружили, что потребляемая энергия ротора связана со средней скоростью потока обратно пропорциональной зависимостью: с уменьшением средней скорости потребляемая энергия увеличивается. Изучение вертикального распределения скорости в канале показало, что максимальная скорость наблюдается у поверхности близ ротора, а минимальная — непосредственно под ротором. При установке шандор или барьеров на определенных участках канала вертикальное распределение скорости становилось почти однородным и скорость насыщения воды кислородом возрастала. Шандоры увеличивают потребность в энергии (Stalzer and Von der Emde, 1972).

Бух и др. (Busch et al., 1974) сравнили эффективность лопастного колеса, биофильтра с аэратором, разбрызгивающим воду, поверхностного разбрызгивателя и эжекторной установки для аэрации прудов с сомиком-кошкой. Они установили, что лопастное колесо потребляет значительно меньшую мощность — 10,4 кВт $\cdot$ ч на 1 кг кислорода, внесенного в пруд, чем другие устройства. Для разбрызгивания воды по поверхности пруда требуется большая мощность — от 47 до 103 кВт $\cdot$ ч на 1 кг кислорода.

Методика выбора числа и размеров поверхностных аэраторов сводится к следующему:

- 1) определяют потребности систем в кислороде (см. ниже);
- 2) определяют KLa . В эту величину (которая обычно указывается в паспорте) вносят поправку на температуру воды по уравнению (15.14);
- 3) определяют α по значению KLa для чистой и сточной воды в сходных условиях;

* Формула эмпирическая, поэтому все входящие в нее величины приведены в английской системе единиц.

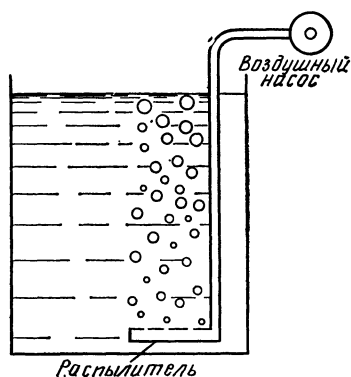


Рис. 15.16. Простой аэратор с распылителем

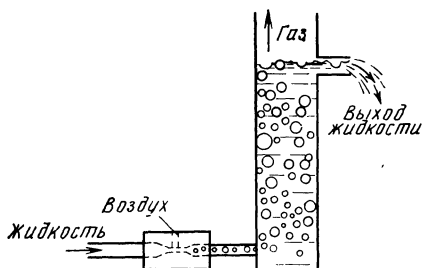


Рис. 15.17. Трубка Вентури

4) определяют будущий градиент концентрации кислорода при работе аэратора;

5) определяют скорость перехода кислорода в воду за 1 ч

$$PK = K_L a (C_s - C) 10^{-6}, \quad (15.12)$$

где $K_L a$ — суммарный коэффициент перехода кислорода, ч⁻¹; C_s — насыщение сточных вод кислородом в данных условиях, мг/л; C — концентрация кислорода во время работы, мг/л; V — объем аэрируемой воды, л;

6) разделив потребности в кислороде на скорость насыщения кислородом за 1 кВт·ч для данного типа аэратора, определяют общую потребляемую мощность аэратора, необходимую для насыщения воды кислородом;

7) разделив общую потребляемую мощность на мощность аэратора данного типа, определяют необходимое для работы число аэраторов;

8) аэраторы размещают равномерно по площади бассейна.

Распылительные аэраторы. Распылительные аэраторы (распылители) подают воздух или кислород в воду в виде пузырьков, а затем кислород переходит из пузырьков в воду диффузией через жидкостную пленку. Поскольку пузырьки воздуха поднимаются в столбе воды, между водой и пузырьками существует движение. Это вызывает циркуляцию воды и увеличение поверхности, вступающей в контакт с пузырьками, что интенсифицирует насыщение воды кислородом.

Существует несколько типов распылителей. Наиболее простой из них представляет собой трубу, помещенную в бассейн с водой. Воздух, подаваемый насосом в трубу, образует у дна пузырьки, которые в жидкости всплывают, а кислород переходит в воду. Такое устройство малоэффективно, так как пузырьки получаются крупными, а поверхность перехода кислорода сравнительно невелика. На рис. 15.16 показано более эффективное устройство, в котором воздух поступает в воду через распылитель. Распылитель

образует мелкие, сравнительно одинаковые пузырьки с большой поверхностью контакта, что усиливает суммарный переход кислорода. Распылители можно изготовлять из различных материалов, в том числе из пластмассы, карборунда и дерева.

Конструкция второго типа распылителя основана на принципе всасывания (рис. 15.17). Правильно спроектированные трубка Вентури, сопла, форсунка или любая другая конструкция, работающая на принципе уменьшения статического давления в трубопроводе, могут обеспечить подачу воздуха в жидкость. Отверстие, соединяющее систему с атмосферой, расположенное в точке пониженного давления, заставляет воздух проникать в поток жидкости. Образуемые таким образом пузырьки аэрируют жидкость. Для такой системы необходим насос и устройство для подсоса воздуха, но не требуется подачи воздуха под давлением.

Рабочие параметры. Скорость насыщения воды кислородом с помощью распылителя зависит от разности концентрации кислорода в пузырьках и окружающей воде, насыщения воды вокруг пузырьков, времени нахождения их в воде, размеров пузырьков (поскольку это определяет площадь контакта), скорости подачи газа и характеристик сточных вод.

Градиент концентрации кислорода между пузырьками и окружающей водой зависит от концентрации кислорода в пузырьке, насыщения воды и скорости обновления жидкостной пленки. Концентрация кислорода в пузырьке зависит от газа, которым он наполнен. Если это воздух, то концентрация кислорода в нем составляет всего 21 %. Однако для увеличения градиента концентрации и скорости насыщения воды кислородом в распылителях можно использовать чистый кислород. Поскольку диффузия кислорода в воду происходит при подъеме пузырьков, концентрация кислорода внутри пузырька и градиент концентрации между водой и воздухом по мере подъема уменьшаются.

Скорость обновления поверхностной пленки пузырьков влияет на скорость проникновения кислорода в воду. Скорость обновления пленки зависит от скорости подъема пузырьков в воде по сравнению со скоростью воды. Зиминский и Уиттмор (Zieminski and Whittmore, 1970) представили данные о скорости подъема пузырьков воздуха, диспергированного в нижней части трубки диаметром 10,1 см, погруженной в большой резервуар. С помощью этих данных, а также данных о скорости подъема пузырьков, полученных Иппеном и Карвером (Irpen and Carver, 1954), можно определить относительную скорость пузырьков (т. е. скорость подъема пузырьков по сравнению со скоростью воды). Теоретически скорость подъема пузырьков составляет около 30 см/с при диаметре пузырьков 0,9 мм (Irpen, Carver, 1954). По данным измерения расхода и с поправкой на объем воздуха относительная скорость пузырьков составит около 20 см/с. Такая разница в скорости пузырьков и воды должна обеспечить быстрое обновление поверхностной пленки и высокую скорость проникновения кислорода в воду. Чем мельче пузырьки, тем меньше относительная ско-

рость пузырьков. Это приводит к снижению скорости обновления пленки, но несколько компенсируется большей площадью поверхности на единицу объема газа.

Диаметр пузырьков оказывает значительное влияние на аэрационные характеристики распылителей: чем меньше пузырьки, тем больше площадь на единицу подаваемого газа и тем больше газа проникает в воду. Мелкие пузырьки медленнее поднимаются (см. табл. 11.41) к поверхности, чем крупные. При этом увеличивается время нахождения пузырьков в воде. Это в свою очередь увеличивает количество кислорода, проникающего в воду. Мелкие пузырьки усиливают турбулентность и перемешивание воды в бассейне. Однако при этом наблюдаются некоторые потери, например из-за снижения скорости скольжения мелких пузырьков, но другие положительные факторы компенсируют эти недостатки*.

Зиминский и Уитмор (1970) установили, что пузырьки диаметром более 3—4 мм обеспечивают почти постоянную скорость обновления воды в бассейне при постоянном расходе газа. Пузырьки диаметром менее 3 мм уменьшают скорость обновления воды (увеличивая перемешивание) при том же расходе воздуха. Это происходит из-за снижения скорости скольжения мелких пузырьков. Даунинг и Бун (1963) установили, что скорость насыщения кислородом резко возрастает при диаметре пузырьков менее 5 мм. Например, в опытах с пропусканием через воду пузырьков газа, содержащих 5 мг/л анионного детергента при 10 °C, коэффициент диффузии воздуха при диаметре пузырьков 5 мм, выпускаемых в бассейне на глубине 1,2 м, составляет 0,05 мл кислорода, абсорбируемого на 100 мл воздуха, прошедшего через систему, при дефиците кислорода, составляющем 1 мг/л на 1 м глубины. При тех же условиях, но со средним диаметром пузырьков 1 мм коэффициент диффузии воздуха составил 0,34 мл O₂ на 100 мл при дефиците кислорода 1 мг/л на 1 м глубины. График зависимости коэффициента диффузии воздуха от диаметра пузырьков представляет собой логарифмическую кривую.

Глубина погружения распылителя также влияет на величину поглощения кислорода: с увеличением глубины абсорбция возрастает. Это прежде всего связано с увеличением времени контакта пузырьков с водой из-за большей глубины погружения. Морган и Бьютра (Morgan and Bewtra, 1963) обнаружили линейную зависимость между глубиной погружения распылителя и абсорбцией кислорода (в %):

$$S = -0,09 + 0,58A, \quad (15.13)$$

где S — глубина погружения распылителя, м; A — абсорбция кислорода, %.

* Здесь автор упускает из виду одно очень важное обстоятельство. Чем мельче пузырьки, тем больше их внутреннее давление в результате поверхностного натяжения, а соответственно, и парциальное давление кислорода. При барботировании вода может оказаться перенасыщенной не только кислородом, но и азотом, что может вызвать азотную эмболию. — *Прим. ред.*

Используя специальные распылители, Морган и Бьютра (1963) получили такую же зависимость. Однако она была нелинейной, и скорость увеличения абсорбции кислорода уменьшалась почти до нуля при глубине погружения распылителя более чем на 4 м. Таким образом, увеличение глубины погружения увеличивает абсорбцию кислорода только до определенной глубины, которая зависит от типа распылителя и других параметров.

Иппен и Карвер (1954) установили линейную зависимость между глубиной погружения и максимальной абсорбцией кислорода при насыщении воды как воздухом, так и чистым кислородом. В этих опытах абсорбция возрастает с увеличением глубины погружения от 50 до 355 см. В этих же экспериментах было показано, что с уменьшением размеров пузырьков абсорбция возрастает.

Бьютра и др. (1970) изучали влияние температуры на абсорбцию кислорода в обескислороженной водопроводной воде. С помощью диффузорной аэрационной установки они установили влияние температуры на коэффициент $K_L a$:

$$(K_L a)_T = (K_L a)_{20} C^{(T-20)}, \quad (15.14)$$

где $(K_L a)$ — скорость переноса кислорода при температуре T ; $(K_L a)_{20}$ — скорость суммарного переноса кислорода при температуре 20°C ; C — константа, равная 1,0192.

Для поверхностных аэраторов константа в уравнении (15.14) равна 1,024 (Аноп, 1972). Эта величина — средняя из полученных разными исследователями. Поскольку данные Бьютра и др. (1970) получены в диапазоне $10\text{--}30^\circ\text{C}$ для водопроводной воды, эти условия ближе всего к тем, которые наблюдаются в системах для культивирования гидробионтов.

Расход газа также влияет на эффективность работы распылителей. Морган и Бьютра (1963) показали, что абсорбция кислорода уменьшается с увеличением расхода воздуха на единицу длины бассейна. Скорость изменения абсорбции уменьшается с увеличением расхода воздуха (т. е. наклон прямой зависимости абсорбции кислорода от расхода воздуха уменьшается с увеличением расхода). Морган и Бьютра (1963) показали, что никаких изменений в абсорбции кислорода с изменением расхода воздуха при использовании распылителя другого типа не наблюдается.

Бьютра и Польковский (Bewtra and Polkowski, 1970) получили сходные результаты для распылителей другого типа. Таким образом, влияние расхода воздуха зависит до некоторой степени от типа распылителя. Следовательно, на увеличение абсолютного количества поглощенного кислорода влияют другие факторы. Увеличение расхода воздуха влечет за собой увеличение площади контакта для проникновения кислорода, что в свою очередь влияет на увеличение коэффициента $K_L a$. Бьютра и Польковский (1970) представили данные, подтверждающие это положение. В их опы-

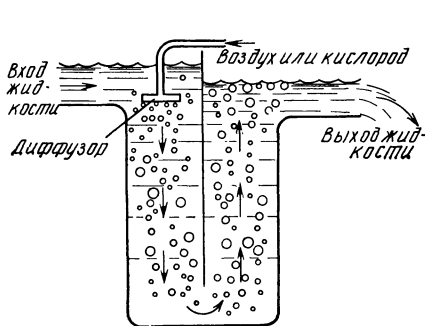


Рис. 15.18. U-образный аэратор

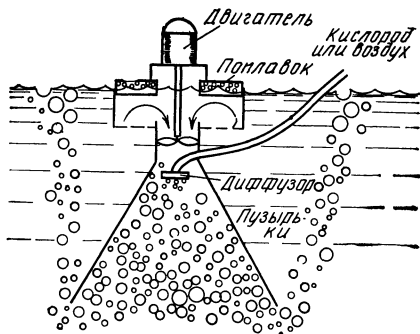


Рис. 15.19. Аэратор с вертикальным потокообразователем

тах при температуре 10°C коэффициент K_{La} изменялся от 0,27 при расходе воздуха 3,26 л/с почти до 1,2 при 15 л/с.

Аэраторы повышенной эффективности. Существует несколько типов аэраторов, которые обладают повышенной эффективностью. К ним относятся: U-образный аэратор, аэратор с вертикальным потокообразователем, в которых захват пузырьков воздуха осуществляется потоком, направленным вниз, и эжекторный аэратор.

U-образный аэратор (рис. 15.18) состоит из U-образной трубы. Вода поступает сверху вниз по одному колену трубы и выходит снизу вверх по другому. Воздух или чистый кислород подается в воду через распылитель, расположенный на входе в U-образную трубу. Расход воды по трубе регулируют так, чтобы она была выше скорости подъема пузырьков в спокойной воде. При таком расходе воды возрастает время ее контакта с пузырьками и концентрация кислорода при насыщении, так как в нижней части U-образной трубы возрастает давление. В результате увеличения времени контакта и градиента концентрации кислорода (т. е. $C_s - C$) при повышенном давлении насыщение воды кислородом интенсифицируется.

Спис и др. (Speece et al., 1969) представили данные по работе U-образной трубы, из которых видно, что потеря напора возрастает с увеличением соотношения воздуха и воды до 0,20. Концентрация растворенного кислорода (РК) (т. е. РК на выходе — РК на входе) возрастает с увеличением отношения воздух : вода и глубины, но при снижении скорости. Количество переданного кислорода на единицу энергии уменьшается с увеличением глубины погружения распылителя и увеличением глубины U-образной трубы. Они также показали, что для любой скорости течения жидкости существуют такие концентрации РК на выходе, которые обеспечивают максимальную эффективность насыщения кислородом $[\text{в мг } \text{O}_2/(\text{кВт} \cdot \text{ч})]$, но величина концентрации РК зависит от скорости течения воды в U-образной трубе. Следует также отметить, что U-образная труба — один из немногих аэраторов, в которых перенасыщение может быть достигнуто сравнительно просто и

эффективно, прежде всего в результате увеличения давления в нижней части U-образной трубы. Перенасыщение в U-образной трубе может быть достигнуто при погружении на глубину 12,2 м и условии, что на выходе концентрация РК составляет всего 50 % насыщения (Speese and Orosco, 1970).

Спис и Ороско (1970) составили уравнение регрессии, связывающее несколько рабочих параметров U-образной трубы:

$$PK_0 = 20 + 0,76(PK)_i + 295(BB) + 0,14d - 2,50(PK)_i(BB), \quad (15.15)$$

где PK_0 — насыщенность растворенного кислорода на выходе U-образной трубы, %; PK_i — насыщенность растворенным кислородом на входе U-образной трубы, %; BB — соотношение воздуха и воды, десятичные доли; d — глубина погружения U-образной трубы, м.

Аэратор с вертикальным потокообразователем. Подаваемый распылителем воздух или кислород (рис. 15.19) поступают в воду через раструб. В верхней части раструба скорость воды превышает скорость подъема пузырьков, а у дна — скорость воды несколько ниже скорости подъема пузырьков. Таким образом, продолжительность контакта воды с газом определяется расходом газа, поскольку пузырьки у дна выталкиваются из-под раструба новыми пузырьками, поступающими из распылителя. Спис с соавторами (Speese et al., 1971) с помощью модели и опытной установки показали, что между эффективностью абсорбции кислорода и количеством кислорода, поступившего в воду, существует линейная зависимость. При низком содержании кислорода в воде можно добиться почти 100 %-ной абсорбции кислорода. Сходные результаты были получены и в экспериментах с аэрацией воды воздухом, за исключением того, что эффективность максимальной абсорбции составляла 30 % в отличие от почти 100 %-ной абсорбции чистого кислорода. Для установки, которую они использовали, концентрация кислорода в пузырьках (из чистого кислорода) за 3,5 мин снизилась со 100 до 5 %.

Эжекторный аэратор (рис. 15.20) представляет собой аэратор

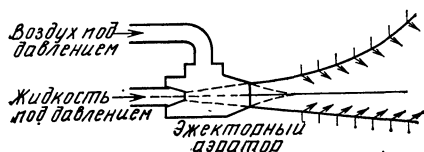


Рис. 15.20. Эжекторный аэратор

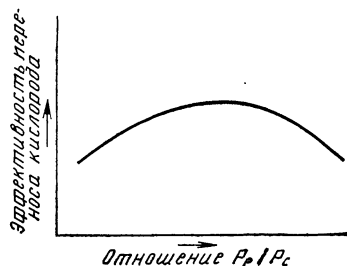


Рис. 15.21. Зависимость эффективности перехода кислорода в воду от отношения мощности пропеллера к мощности воздушного компрессора в турбинном аэраторе

с форсункой. Жидкость под высоким давлением подается через форсунку. Отдельно подается сжатый газ. В зоне смешивания газа и жидкости происходит сильная турбулентность и мгновенное поглощение кислорода.

Сравнение устройств для аэрации. Для интенсификации насыщения воды кислородом необходимо максимальное количество пузырьков воздуха минимального диаметра. Использование чистого кислорода вместо воздуха или смеси воздуха с чистым кислородом ускоряет процесс за счет увеличения концентрации насыщения и градиента.

Эйхенфельдер (1969) считает, что эффективность распылителей, расположенных вдоль бассейна, повышается, если ширина бассейна вдвое превышает глубину. Отношение ширины к глубине бассейна можно увеличить до 4:1, если распылитель разместить в центре бассейна. При очистке сточных вод основная цель перемешивания — поддержание твердых частиц во взвешенном состоянии; для чистой воды основная цель — увеличить скорость прохождения кислорода через поверхность раздела вода — воздух. Большинство распылителей дают пузырьки газа диаметром 2,0—2,5 мм. Пузырьки меньшего диаметра можно получать в специальных распылителях, но при том же расходе газа перепад давления газа, через распылитель возрастает. Закупоривание отверстий распылителя примесями, содержащимися в газе, осложняет их очистку, если размер отверстий слишком мал.

Потребляемая мощность распылителей зависит от эффективности работы воздушного компрессора, глубины, на которой воздух выходит в воду через распылитель, размера пузырьков, потерь в системе воздухоподачи и других параметров, рассмотренных выше. Эффективность абсорбции кислорода варьирует от 0 до почти 100 % в зависимости от условий работы всей системы.

Очень трудно сравнивать эффективность работы аэраторных систем, поскольку имеется очень мало данных относительно работы различных типов аэраторов в сходных условиях. Скотт (Scott, 1972) сравнивал эффективность нагнетания воздуха под поверхность воды через форсунку при помощи керамзитовых распылителей и через форсунки, разбрызгивающие воду по поверхности бассейна. Он установил, что наиболее эффективным является аэратор с форсункой, расположенной у дна. Эффективность керамзитовых распылителей составляет 53 % эффективности сопел Вентури, а эффективность форсунок, разбрызгивающих воду по поверхности, составляет только 41 %. Поскольку при этих расчетах не учитывались объемы воздуха, использованные для каждой системы, эти данные содержат некоторые неучтенные параметры.

В соплах Вентури и других установках, работающих на принципе подсоса воздуха, требуются водяные насосы, а не компрессоры. Для аэраторов с керамзитовыми или другими распылителями требуются компрессоры, а не водяные насосы. Только в аэраторах с вертикальным потокообразователем и в U-образной установке используются одновременно и компрессор, и водяной насос.

Выбор аэратора определенного типа зависит прежде всего от таких факторов, как наличие сжатого газа, аэрируемая площадь, наличие насоса для подачи жидкости и удобство обслуживания. Экономика также должна учитываться, но общие капитальные затраты и текущие расходы для различных типов аэраторов должны учитываться для каждой установки в отдельности.

Турбинные аэраторы. Простой турбинный аэратор состоит из винта, погруженного в аэрируемую жидкость. При вращении винта жидкость также приходит в движение, способствуя лучшей аэрации на поверхности. Различные исследователи по-разному определяют турбинные аэраторы. Так, Эйхенфельдер (1969) определяет турбинные аэраторы как сочетание турбины, описанной выше, и распылителя. Его турбинный аэратор состоит из винта или нескольких пропеллеров, насаженных на один вертикальный вал, и распылителя, расположенного под одним из винтов, обычно самым глубоким. Распылитель не должен производить мелкие пузырьки, поскольку винт создает скоростной поток. Таким образом, размер пузырьков зависит от расхода газа, частоты вращения винта и свойств жидкости.

$$P_0 = n/(1 - n). \quad (15.16)$$

Насыщение воды кислородом с помощью турбинного аэратора без распылителя зависит от частоты его вращения, свойств жидкости и дефицита кислорода в ней. При увеличении частоты вращения возрастает скорость насыщения воды кислородом. При увеличении дефицита кислорода (т. е. разницы между концентрацией насыщения кислородом и истинной концентрацией кислорода в жидкости) возрастает скорость насыщения воды кислородом, так как возрастают движущие силы. Свойства жидкости по сравнению с чистой водой могут увеличивать или уменьшать скорость насыщения воды кислородом в зависимости от таких важных факторов, как концентрация поверхностно-активных веществ и температура.

Эффективность насыщения воды кислородом (количество кислорода, поступающего в жидкость, на 1 кВт·ч затраченной энергии) пропорциональна отношению потребляемой мощности винта P_p к потребляемой мощности компрессора P_c . Если n принять за мощность, представляющую собой отношение P_p/P_c . Максимальная эффективность обычно наблюдается при равных мощностях компрессора и винта (Echenfelder, 1969). Таким образом, одинаковое потребление мощности винтом и воздушным компрессором обеспечивает максимальную эффективность насыщения воды кислородом. Увеличение мощности воздушного компрессора приводит к увеличению размеров пузырьков и, следовательно, к уменьшению эффективности насыщения. Увеличение мощности, потребляемой винтом, приводит к чрезмерному перемешиванию, одновременно уменьшается обновление воды на каждую единицу расходуемой мощности.

Эйхенфельдер (1969) показал, что турбинные аэраторы с распылителями, используемые для обработки бытовых стоков, обес-

печивают эффективность насыщения от 1,5 до 1,8 кг O_2 /(кВт·ч). Следует также отметить, что установки для обработки сточных вод часто работают при низком содержании кислорода (от 0,5 до 1,0 мг/л), что значительно ниже, чем в системах для культивирования водных организмов. Поскольку дефицит кислорода в сточных водах выше, эффективность аэрации там выше, чем при использовании тех же аэраторов в системах для культивирования.

Турбинные аэраторы находят ограниченное применение в бассейнах для выращивания рыб, так как лопасти могут травмировать рыбу. Однако эти аэраторы можно использовать в бассейнах с неподвижными видами, например устрицами, или их можно устанавливать в бассейнах, не предназначенных непосредственно для культивирования.

ВЫБОР АЭРАТОРА

Выбор аэратора для той или иной системы зависит от ее характеристик, стоимости, наличия аэраторов разных типов и других факторов. Поверхностные аэраторы обладают максимальной эффективностью насыщения кислородом и находят широкое применение, поскольку их стоимость и затраты на эксплуатацию наименьшие. Распылительные устройства можно использовать и как эрлифты, и как аэраторы, что делает их приобретение экономически целесообразным. Гравитационные аэраторы наиболее выгодны с экономической точки зрения при наличии достаточного перепада уровня, поскольку это позволяет их использовать без насосов, U-образные аэраторы можно применять в тех случаях, когда необходимо достичь перенасыщения воды. В системах для культивирования гидробионтов перенасыщения следует избегать из-за опасности возникновения газопузырьковой болезни.

Методика определения числа и типа аэраторов сводится к следующему.

1. Определяют потребности в кислороде, включая химическое и биологическое потребление кислорода. Биологическое потребление кислорода складывается из потребления кислорода культивируемыми организмами, бактериями биофильтра и свободноживущими бактериями. Учитывая, что рыбы в стрессовом состоянии потребляют больше кислорода, необходимо предусмотреть в системе избыток кислорода.

2. Выбирают тип аэратора из расчета особенностей данной системы и стоимости.

3. Определяют эффективность аэрации по данным завода-изготовителя.

4. Вносят в данные завода-изготовителя поправку на температуру, градиент кислорода и свойства жидкости, используя для этого уравнения, приведенные выше, и данные лабораторных испытаний.

5. Выбирают стандартный размер аэратора с тем, чтобы аэрация была однородной по всей площади бассейна.

6. Определяют необходимое число аэраторов.
7. Располагают аэраторы в системе так, чтобы каждый аэратор аэрировал одинаковый объем жидкости.

АЭРАЦИЯ ЗАМКНУТЫХ ВОДОЕМОВ

Многие исследователи (Steichen et al., 1974; Speece, 1971; Speece and Rayuan, 1973; Ziemiński and Whitemore, 1970) изучали вопросы аэрации озер, бассейнов и других закрытых водоемов. Аэрацию осуществляют для улучшения качества воды, она практикуется во многих бассейнах с питьевой водой, или просто воду аэрируют для увеличения содержания в ней кислорода. В результате аэрации снижается содержание марганца и железа в воде (прежде всего потому, что эти металлы менее растворимы в воде, насыщенной кислородом, чем в анаэробных условиях). Кроме того, в результате аэрации нарушается термическая стратификация и содержание кислорода в воде увеличивается. В результате дестратификации вертикальное распределение температуры изменяется, что может привести к положительным или отрицательным последствиям. При стратификации температура воды у дна ниже, что полезно для холодолюбивых рыб, или, если вода предназначена для питьевых целей. В холодной воде содержание кислорода низкое из-за отсутствия водообмена, что вызывает изменение вкусовых и ароматических качеств воды. При этом снижается качество воды для рыб. Дестратификация снижает температуру воды на поверхности (летом) и повышает температуру воды у дна. Это также исключает низкое содержание кислорода в воде или возникновение анаэробных условий у дна.

В связи с тем, что стратификация обычно происходит в водоемах глубиной свыше 6 м, поверхностные аэраторы в данном случае малопригодны. Турбинные аэраторы в виде насосов, подающих воду вверх и вниз, и распылительные аэраторы наиболее приемлемы. Аэраторы с вертикальным потокообразователем (U-образные аэраторы) (Speece, 1971) также можно использовать для аэрации воды в гипolimнионе без нарушения стратификации. Это иногда практикуется для резервуаров, где содержатся холодолюбивые виды рыб или где хранится питьевая вода, поскольку при этом наблюдается наилучшее насыщение воды кислородом и вода остается холодной.

Стейхену с соавторами (Steichen et al., 1974) удалось обогатить воду кислородом в 40-гектарном озере объемом $115 \cdot 10^4 \text{ м}^3$ за две недели с помощью электродвигателя мощностью 373 Вт. Температурная дестратификация была достигнута быстрее, чем кислородная. Перекачивание снизило БПК и pH в поверхностном слое воды.

Используя усовершенствованный U-образный аэратор для предотвращения нарушения температурной стратификации, Спис (1971) рассчитал эффективность поглощения $1,36 \text{ кг O}_2$ на $1 \text{ кВт} \cdot \text{ч}$. Спис и Райан (Speece and Rayuan, 1973) разработали

математическую модель для расчета формы, скорости подъема пузырьков и изменения концентрации кислорода в струях распылителя, установленного в закрытом водоеме. Полученные результаты они представили в графической форме, а в некоторых случаях — в виде математических уравнений. Они показали, что скорость подъема пузырьков быстро уменьшается непосредственно над распылителем до тех пор, пока не достигнет постоянной величины примерно в 10 м над ним. Ширина шлейфа пузырьков связана линейной зависимостью с расстоянием над распылителем. Расход воды в шлейфе также линейно связан с высотой над распылителем, увеличиваясь с увеличением высоты.

Таким образом, дестратификация в водоемах более благоприятна для контроля качества питьевой воды и для рыб — объектов спортивного рыболовства, но не для систем аквакультуры, поэтому эти системы описаны здесь кратко. Читатели, непосредственно занимающиеся вопросами аквакультуры, могут получить интересующую их информацию из приведенного ниже списка литературы.

REFERENCES

- Anon. (1972). Handbook on Aerators, Section 3, Principles of Aeration. Aqua-Jet, Aqua-Aerobic Systems, Inc., Rockford, Ill.
- Anon. (1973). Air Gun Aims at Fish Kills. Sea Grant 70's 3(6): 1. National Oceanic and Atmospheric Administration. Washington, D. C.
- Bewtra, Jatinder K., William R. Nicholas, and Lawrence B. Polkowski (1970). Effect of Temperature on Oxygen Transfer in Water. Water Research 4: 115—123.
- Buelتمان, C., G. Wesson, J. Termini, and W. Kingsbury (1963). Power Requirements for Oxygen Transfer with Turbine Aerators, in Advances in Biological Waste Treatment, W. W. Echenfelder, Jr., and J. McCabe, Eds. Macmillan, New York, pp. 175—179.
- Busch, A. W. (1970). Biological Factors in Aerator Performance. Water and Sewage Works 117: 384—388.
- Busch, C. D., J. L. Koon, and R. Allison (1974). Aeration, Water Quality and Catfish Production. Transactions of the American Society of Agricultural Engineers 17 (3): 433—435.
- Chasick, A. H. (1963). Plant Tests of Sparger and Tube Types of Diffusers, in Advances in Biological Waste Treatment, W. W. Echenfelder, Jr., and J. McCabe, Eds. Macmillan, New York, pp. 195—197.
- Chesness, Jerry L. and Jerry L. Stephens (1971). A Model Study of Gravity Flow Cascade Aerators for Catfish Raceway Systems, Transactions of the American Society of Agricultural Engineers, 14 (6): 1167—1169, 1174.
- Chesness, Jerry L., Leon J. Fussell, and Thomas K. Hill (1973). Mechanical Efficiency of a Nozzle Aerator. Transactions of the American Society of Agricultural Engineers 16 (1). 67—68, 71.
- Cooney, Charles L., and Daniel I. C. Wang (1971). Oxygen Transfer and Control, in Biological Waste Treatment, Raymond P. Carrale, Ed. Wiley-Interscience, New York, pp. 63—75.
- Downing A. L. and A. G. Boon (1963). Oxygen Transfer in the Activated Sludge Process, in Advances in Biological Waste Treatment, W. W. Echenfelder, Jr., and J. McCabe, Eds. Macmillan, New York, pp. 131—148.
- Echenfelder, W. W. Jr. (1952). Aeration Efficiency and Design: I. Measurement of Oxygen Transfer Efficiency, Journal of the Water Pollution Control Federation 24 (10): 1221—1228.
- Echenfelder, W. W., Jr (1952). Aeration Efficiency and Design from Pilot Plant Data. Journal of the Water Pollution Control Federation 24(11): 1361—1367.

Echenfelder, W. W. Jr. (1967). Engineering Aspects of Surface Aeration Design, in Proceedings of the 22nd Industrial Waste Conference, Engineering Extension Series No. 129. Purdue University, West Lafayette, Ind., pp. 279—291.

Echenfelder, W. W., Jr. (1969). Oxygen Transfer and Aeration. Water Resource Management Series, Vol. I. Manual of Treatment Processes, W. W. Echenfelder, Ed. Environmental Sciences Service Corporation.

Fair, Gordon Muskew, John Charles Geyer, and Daniel Alexander Okum (1968). Water and Wastewater Engineering. Vol. 2. Water Purification and Wastewater Treatment and Disposal. Wiley, New York.

Hsu, H. H., K. B. Wang, and T. L. Fan (1975). Oxygen Transfer and Absorption Efficiencies in Bubble Columns. Water and Sewage Works 122 (2): 34—37.

Huang, Jerry Y. C. and Mikkel G. Mandt (1973). Jet Aeration Theory and Application. Proceedings of the 28th Industrial Waste Conference, Purdue University, West Lafayette, Ind.

Hurwitz, E., R. C. Gloppen, and John Roeber (1963). Oxygen Absorption Capacity of the Simplex Hi—Cone Aerator, in Advances in Biological Waste Treatment. W. W. Echenfelder, Jr., and J. McCabe, Eds. Macmillan, New York. pp. 399—405.

Ippen, Arthur T. and Charles E. Carver, Jr. (1954). Basic Factors of Oxygen Transfer in Aeration Systems. Sewage and Industrial Wastes 26 (7): 813—827.

Kalbskopf, K. H. (1972). Flow Velocity in Aeration Tanks with Mechanical Aerators. Water Research 6: 413—416.

Kelinske, A. A. (1963). Power Consumption for Oxygenation and Mixing, in Advances in Biological Waste Treatment, W. W. Echenfelder, Jr., and J. McCabe, Eds. Macmillan, New York, pp. 157—168.

Knop, E. and K. H. Kalbskopf (1969). Energy and Hydraulic Tests on Mechanical Aeration Systems. Advances in Water Pollution Research. Proceedings of the Fourth International Conference held in Prague. Pergamon Press, Oxford, England.

Kolega, John J., Gordon L. Nelson, and Quintin B. Graves (1969). Analyses for Oxygen Transfer Coefficients in Rotor Aeration Systems. Animal Waste Management, A Conference on Agricultural Waste Management. Cornell University, Ithaca, N. Y.

Kormanik, Richard (1976). How Does Tank Geometry Affect the Oxygen Transfer Rate of Mechanical Surface Aerators? Water and Sewage Works 123 (1): 64—67.

Lesperance, T. W. (1963). The Performance and Capability of Mechanical Aerators in Activated Sludge Processing, in Advances in Biological Waste Treatment, W. W. Echenfelder, Jr., and J. McCabe, Eds. Macmillan, New York. pp. 169—174.

Maise, George (1970). Scaling Methods for Surface Aerators. Journal of the Sanitary Engineering Division. Proceedings of the American Society of Civil Engineers 96 (SAS): 1079—1083.

McKeown, J. J. and D. A. Okun (1963). Effects of Surface Active Agents in Oxygen Bubble Characteristics, in Advances in Biological Waste Treatment, W. W. Echenfelder, Jr., and J. McCabe, Eds. Macmillan, New York, pp. 113—122.

Moore, Theodore L. (1972). Basic Criteria and Design Aspects for Deep Aeration Tanks. Water Research 6: 407—412.

Morgan, P. F. and J. K. Bewtra (1963). Diffused Air Oxygen Transfer Efficiencies, in Advances in Biological Waste Treatment, W. W. Echenfelder, Jr., and J. McCabe, Eds. Macmillan, New York, pp. 181—193.

Nusbaum, Isadore and Harold E. Miller (1952). Stream Pollution: The Oxygen Resources of San Diego Bay. Journal of the Water Pollution Control Federation 24 (12). 1512—1527.

O'Connor, Donald J. (1963). Effects of Surface Active Agents on Re-Aeration, in Advances in Biological Waste Treatment, W. W. Echenfelder, Jr., and J. McCabe, Eds. Macmillan, New York, pp. 123—130.

Polta, Robert Charles (1970). An Examination of the Operating Parameters of a Mechanical Surface Aeration Unit. Unpublished Ph. D. dissertation, University of Minnesota (original not available), abstracted in Dissertation Abstracts International 32 (section B), No. 1: 280—281.

Scott, K. R. (1972). Comparison of the Efficiency of Various Aeration Devices for Oxygenation of Water in Aquaria. *Journal of the Fisheries Research Board of Canada* 29(11): 1641—1643.

Speece, Richard E., Jack L. Adams, and Carolyn B. Wooldridge (1969). U-Tube Aeration Operating Characteristics. *Journal of the Sanitary Engineering Division. Proceedings of the American Society of Civil Engineers* 95 (SA3): 563—574.,

Speece, Richard, E. (1970). Aeration of Oxygen—Efficient Impoundment Releases, in *Advances in Water Pollution Research*. Vol. 2. Proceedings of the Fifth International Conference, San Francisco and Hawaii. Pergamon Press, Oxford, England (1971). pp. 111—29/1—111—29/11.

Speece, Richard E. and Rudolph Orosco (1970). Design of U-Tube Aeration Systems. *Journal of the Sanitary Engineering Division. Proceedings of the American Society of Civil Engineers* 96(SA3): 715—725.

Speece, Richard E., Marcos Madrid, and Kenneth Needham (1971). Downflow Bubble Contact Aeration. *Journal of the Sanitary Engineering Division. Proceedings of the American Society of Civil Engineers* 97(SA4): 433—441.

Speece, Richard E. (1971). Hypolimnion Aeration. *Journal of the American Water Works Association* 63(1): 6—9.

Speece, Richard E. and Fawji Rayyan (1973). Hypolimnion Aeration with Commercial Oxygen., Vol. 1. Dynamics of Bubble Plume. Environmental Protection Technology Series EPA—6602—73—025a. U.S. Environmental Protection Agency, Office of Research and Development, Washington, D. C.

Stalzer, W. and W. Von der Emde (1972). Tanks with Turbulent Flow Generated by Mammoth Rotors. *Water Research* 6: 417—421.

Steichen, J. M., J. E. Garton, and C. E. Rice (1974). The Effect of Lake Destratification on Water Quality Parameters. Paper 74—5008, American Society of Agricultural Engineers. St. Joseph, Mich.

Strasburg, Donald W. (1964). An Aerating Device for Salt Well Water, in *Sea Water Systems for Experimental Aquariums: A Collection of Papers*. Research Report 63, U.S. Bureau of Sport Fisheries and Wildlife, pp. 161—167.

Symons, J. M., J. K. Carswell, and G. G. Robeck (1970). Mixing Water Supply Reservoirs for Quality Control. *Journal of the American Water Works Association* 62(5): 322—334.

Tebbutt, T. H. Y. (1972). Some Studies on Reaeration in Cascades. *Water Research* 6: 297—304.

Weston, Roy F. and Vernon T. Stack, Jr. (1963). Fundamentals of Operation of Entrainment Aerators, in *Advances in Biological Waste Treatment*, W. W. Echenfelder, Jr., and J. McCabe, Eds. Macmillan New York, pp. 149—156.

Zieminski, Stefan A. and Raymond C. Whittemore (1970). Induced Air Mixing of Large Bodies of Polluted Water. *Water Pollution Control Research Series* 16080 DWP 11/70. U.S. Environmental Protection Agency, Water Quality Office, Washington. D. C.

ПРИЛОЖЕНИЕ

Международная система единиц (СИ)

Основные единицы СИ

Величина	Наименование	Единица
Длина	метр	м
Масса	килограмм	кг
Время	секунда	с
Сила электрического тока	ампер	А
Термодинамическая температура	кельвин	К
Количество вещества	моль	моль
Сила света	кандела	кд

Множители и приставки для образования десятичных кратных и дольных единиц и их наименования

Множитель	Приставка		Множитель	Приставка	
	наименование	обозначение		наименование	обозначение
10^{12}	тера	Т	10^{-2}	санти	с
10^9	гига	Г	10^{-3}	милли	м
10^6	мега	М	10^{-6}	микро	мк
10^3	кило	к	10^{-9}	нано	н
10^2	гекто	г	10^{-12}	пико	п
10^1	дека	да	10^{-15}	фемто	ф
10^{-1}	деци	д	10^{-18}	атто	а

Дополнительные и производные единицы СИ

Величина	Наименование	Обозначение	Наименование в основных единицах СИ
Электрическая емкость	фарада	Ф	$\text{м}^{-2} \cdot \text{кг}^{-1} \cdot \text{с}^4 \cdot \text{а}^2$
Электрическая проводимость	сименс	См	$\text{м}^{-2} \cdot \text{кг}^{-1} \cdot \text{с}^3 \cdot \text{А}^2$
Электрическое напряжение, электрический потенциал	вольт	В	$\text{м}^2 \cdot \text{кг} \cdot \text{с}^{-3} \cdot \text{А}^{-1}$
Электрическое сопротивление	ом	Ом	$\text{м}^2 \cdot \text{кг} \cdot \text{с}^{-3} \cdot \text{А}^{-2}$
Энергия, работа, количество теплоты	джоуль	Дж	$\text{м}^2 \cdot \text{кг} \cdot \text{с}^{-2}$
Сила	ньютон	Н	$\text{м} \cdot \text{кг} \cdot \text{с}^{-2}$
Частота	герц	Гц	с^{-1}
Освещенность	люкс	лк	$\text{м}^{-1} \cdot \text{кд} \cdot \text{ср}$
Индуктивность	генри	Г	$\text{м}^2 \cdot \text{кг} \cdot \text{с}^{-2} \cdot \text{А}^{-2}$
Световой поток	люмен	лм	$\text{кд} \cdot \text{ср}$
Поток магнитной индукции	вебер	Вб	$\text{м}^2 \cdot \text{кг} \cdot \text{с}^{-2} \cdot \text{А}^{-1}$
Магнитная индукция	тесла	Т	$\text{кг} \cdot \text{с}^{-2} \cdot \text{А}^{-1}$
Плоский угол	радиан	рад	—
Мощность, поток энергии	ватт	Вт	$\text{м}^2 \cdot \text{кг} \cdot \text{с}^{-3}$

Величина	Наименование	Обозначение	Наименование в основных единицах СИ
Давление	паскаль	Па	$\text{м}^{-1} \cdot \text{кг} \cdot \text{с}^{-2}$
Количество электричества, электрический заряд	кулон	Кл	$\text{с} \cdot \text{А}$
Телесный угол	стерадиан	ср	—

Перевод неметрических единиц в единицы СИ

Наименование	Единица	Множитель
акр	м^2	$4,047 \cdot 10^3$
акр-фут	м^3	$1234 \cdot 10^3$
ангстрем	м	$1000 \cdot 10^{-10}$
атмосфера	Па	$1013 \cdot 10^5$
бар	Па	$1000 \cdot 10^5$
британская единица тепла	Дж	$1056 \cdot 10^3$
британская единица тепла	кВт·ч	$2,928 \cdot 10^{-4}$
британская единица тепла-дюйм в час на квадратный фут-градус Фаренгейта	Вт/(м·К)	0,1441
британская единица тепла на фунт	Дж/кг	$2,326 \cdot 10^3$
британская единица тепла в секунду	Вт	$1,054 \cdot 10^3$
бушель (США)	м^3	0,03523
калория	Дж	4,1840
калория на грамм	Дж/кг	$4,184 \cdot 10^3$
сантиметры ртутного столба (0°C)	Па	$1,333 \cdot 10^3$
сантиметры водяного столба (4°C)	Па	98,06
сантипуаз	Па·С	0,0010
сантистокс	$\text{м}^2/\text{С}$	$1,00 \cdot 10^{-6}$
Чейн	м	20,12
кубический ярд	м^3	0,7646
средний солнечный день	с	$8,640 \cdot 10^4$
британская единица тепла в час на квадратный фут-градус Фаренгейта	Вт/(м ² ·К)	0,17623
длина	Н	$1,000 \cdot 10^{-5}$
эрг	Дж	$1,000 \cdot 10^{-7}$
эрг на сантиметр квадратный	Вт/м ²	$1,000 \cdot 10^{-3}$
эрг в секунду	Вт	$1,000 \cdot 10^{-7}$
фатом (морская сажень)	м	1,829
унция жидкостная (США)	м^3	$2,957 \cdot 10^{-5}$
фут	м	0,3048
кубический фут в секунду	$\text{м}^3/\text{с}$	0,02832
кубический фут	м^3	0,02832
квадратный фут	м^2	0,09290
фут водяного столба	Па	$2,989 \cdot 10^3$
фут-кандела	Лм/м ²	10,76
фут-кандела	Лк	10,76
фут-ламберт	кд/м ²	3,426
фунт-сила-фут	Дж	1,356
фунт-сила-фут в секунду	Вт	1,356
фут на секунду в квадрате	$\text{м}/\text{с}^2$	$2,580 \cdot 10^{-5}$

Наименование	Единица	Множитель
ускорение	м/с ²	9,807
галлон жидкостный	м ³	$4,546 \cdot 10^{-3}$
галлон (Великобритания)	м ³	$4,546 \cdot 10^{-3}$
галлон сухой (США)	м ³	$4,405 \cdot 10^{-3}$
галлон жидкостный (США)	м ³	$3,785 \cdot 10^{-3}$
галлон жидкостный (США) в секунду	м ³ /с	$6,309 \cdot 10^{-5}$
грамм	кг	$1000 \cdot 10^{-3}$
лошадиная сила	Вт	$7,457 \cdot 10^2$
дюйм	м	0,02540
дюйм в квадрате	м ²	$6,452 \cdot 10^{-4}$
дюйм в кубе	м ³	$1,639 \cdot 10^{-5}$
дюйм ртутного столба (32°F)	Па	$3,386 \cdot 10^3$
дюйм водяного столба (39,2°F)	Па	$2,491 \cdot 10^2$
килограмм-сила	Н	9,807
килограмм-сила на квадратный метр	Па	9,807
килограмм-масса	кг	1,000
километр в час	м/с	27,78
киловатт-час	Дж	$3,600 \cdot 10^6$
узел (международный)	м/с	0,5144
ламберт	кд/м ²	$3,183 \cdot 10^3$
лэнгли (поток энергии на единицу площади)	Дж/м ²	$4,184 \cdot 10^4$
литр	м ³	$1,000 \cdot 10^{-3}$
микрон	м	$1,000 \cdot 10^{-6}$
мил	м	$2,540 \cdot 10^{-5}$
миля (морская)	м	$1,852 \cdot 10^3$
миля (английская)	м	$1,853 \cdot 10^3$
миля (США)	м	$1,852 \cdot 10^3$
миля законная (США)	м	$1,609 \cdot 10^3$
миля законная (США) в час	м/с	0,4470
миля законная (США) в час	км/ч	1,609
миллибар	Па	$1,00 \cdot 10^2$
мм рт. ст.	Па	$1,333 \cdot 10^2$
минута (для плоского угла)	рад	$2,909 \cdot 10^{-4}$
пек (США)	м ³	$8,810 \cdot 10^{-3}$
пинта сухая (США)	м ³	$5,506 \cdot 10^{-4}$
пинта жидкостная (США)	м ³	$4,732 \cdot 10^{-4}$
пуаз (абсолютная вязкость)	Па·с	0,1000
фунт-сила	Н	4,448
фунт-сила на квадратный дюйм	Па	$6,895 \cdot 10^3$
фунт-сила — секунда на квадратный фут	Па·с	47,88
фунт-масса	кг	0,4536
фунт-масса на фут-секунду	Па·с	1,488
род (мера длины)	м	5,029
слаг	кг	14,59
слаг на кубический фут	кг/м ³	$5,153 \cdot 10^2$
слаг на фут-секунду	Па·с	47,88
квадратный ярд	м ²	0,8361
стокс (кинематическая вязкость)	м ² /с	$1,000 \cdot 10^{-4}$
тонна (длинная)	кг	$1,016 \cdot 10^3$
тонна (метрическая)	кг	$1,000 \cdot 10^3$
тонна (короткая)	кг	$9,072 \cdot 10^2$
ватт-час	Дж	$3,600 \cdot 10^3$
ярд	м	0,9144

А

Азот 116, 132, 143, 145
Аквакультура 11, 13, 23
Акклимация 78
Аммиак 134
Апвеллинг 67
Аэратор поверхностный 504
— с вертикальным потокообразова-
телем 511
Аэраторы 498, 499
— гравитационные 494
— поверхностные 500
— повышенной эффективности 510
— распылительные 506
— турбинные 513
Аэрация 490
— замкнутых водоемов 515

Б

Бактерии анаэробные 130
Баланс тепловой общий 55
— энергетический 52
Бассейн спиральный 343
— Фостера — Лукаса 339, 342
— цилиндрический 343
Бассейны 331
— пластмассовые 333
Бентонит 324
Биомасса 156
Борьба с обрастанием 188, 189

В

Вес удельный 193
Вещества органические 141
Виды систем 163
Вода 31, 175., 176, 192
— водопроводная 190
— соленая 187
— солоноватая 187
Водные системы природные 163
Водоемы 186
Водосливы 250

Водоснабжение 176
Воды подземные 180
— проточные 95
Вязкость абсолютная 193
— воды 40
— кинетическая 193

Г

Гамбузия 82
Гидроциклоны 392
Градиент солености 74
Гребешок морской 82
Голец 102, 103, 104
Гундеры 168

Д

Давление гидростатическое 193
— насыщенного пара 44
— осмотическое
Дамбы 315
Дартер айовский 102
Двуокись углерода 105—109, 112, 120
Депрессия уровня грунтовых вод 181,
182
Диск Секки 47
Добавки химические 325

Е

Елец обыкновенный 103

Ж

Железо 137, 148
Жесткость воды 32
Жидкость 192

З

Загрязнение 178
Запас воды мировой 20
Защита от хищников 166
Звезды морские 166
Земледелие 15, 16
Зогы резистентности и толерангнос-
ти 88
Зоопланктон 21

И

Излучение ультрафиолетовое 473
Интенсивность денитрификации 452
— кормления 439
Ионообмен 407, 408
Источники воды 185

К

Калий 140
Калорийность продуктов питания 12
Кальций 131, 139
Каналы выростные 328, 329
— открытые 210, 212
Карась серебряный 82, 85, 102, 103
β-каротин 57
Карп 102, 103
Качество воды 177
Кижуч 103
Колодцы 181
Колюшка трехглазая 103
Краппи черный 102, 104
Кислород 90, 99
Классификация вод по жесткости 33
Клиноград 94
Конвергенция Антарктическая 69
— субтропическая 69
Концентрация биогенных элементов 144
— ионов водорода (рН) 43
— кислорода лимитирующая 192, 103
— химических элементов 149
Коэффициенты кормовые 30
— шероховатости 211
Кремний 120, 131, 140, 143, 148
Круговорот азота 123
— железа 128
— кальция 131
— кремния 131
— серы 130
— углерода 105
— фосфора 126
Культивирование беспозвоночных у дна 167
Кумжа 103

Л

Линь 103
Лосось атлантический 104
Лотки водомерные 262
Лоток Паршелла 266
Лампы ультрафиолетовые 474

М

Магний 139
Макома балтийская 82
Манометры 195
Марикультура 23
Марганец 150
Материалы строительные 331
Метан 117

Моллюски двустворчатые 82
Молодь лосося 103

Н

Население земного шара 11
Насыщение световое 57, 58
Насосы 269
— винтовые 291
— диафрагменные 296, 297
— кулачковые 291
— осевые 283
— пластинчатые 285
— с гибкими пластинами 288
— поршневые 294
— с гибким шлангом 293
— центробежные 272
— — диффузорные 273
— — со спиральной нагнетательной камерой 273
— струйные 281
— шестеренные 288, 290
Натрий 140
Натяжение поверхностное 42
Нитриты 134, 135
Нотемигонус 102, 104
Нотропис 102

О

Области летальные 80
Обликовка водонепроницаемая 326
Облучение ультрафиолетовое 467, 470
Обрастание 169, 188
Ограждения сетные 343, 348, 349
Озера амиктические 63
— голомиктические 63
— димиктические 63, 94
— мономиктические 63
— олиготрофные 94
Озон 481, 482, 484
Озонаторы 485
Озонирование 481
Окунь желтый 103, 104
— малоротый 103
— ушастый 102, 104
— черный большеротый американский 82, 104
Организмы водные 121
— обростатели 188, 189
Отстаивание 383
Отстойник 385, 388
Оценка возможных уловов 22

П

Пестициды 166
Пигменты 56
Планктон 28
Плотва 82, 103
Плотины 315
Плотность 193
— воды 38
— посадки 177
Площадь водной поверхности 19

Показатель преломления воды 49
 Покров глиняный 324
 Полноценность продуктов питания 12
 Потребление зерновых на душу населения 17, 18
 — кислорода активное и стандартное 85
 — биохимическое 163
 — мяса на душу населения 17
 — рыбы на душу населения 22
 Потребности в кислороде минимальные 104
 — пищевые 179
 Приборы для измерения давления 195
 Продуктивность водной среды 56
 — океанов 156, 157, 159
 Продукция аквакультуры 24, 25, 27, 28, 29
 — природных водоемов 20
 Прозрачность воды 47
 Промысел рыбный 19
 Процесс адсорбции 399
 Процессы теплопередачи 55
 Пруды 92, 186, 312
 — обвалованные 313
 — копаные 327
 — рыбоводные 64

Р

Радиус гидравлический 210
 Ракушка песчаная 82
 Растворимость кислорода в воде 91
 Расходомер с погруженным поршнем 247
 Расходомеры переменного перепада давления 233
 — постоянного перепада давления 245
 — специальные 247
 Ресурсы мира водные 19
 — Мирового океана потенциальные 25
 Родники 181
 Ртуть 188
 Ручьи 185
 Рыба солнечная 104
 Рыбы декоративные 24

С

Сероводород 117, 118
 Сера 117, 138
 Силы адсорбции 396
 — Кориолиса 66, 72
 Система буферная 105
 Системы замкнутые 173
 — морские 64, 96
 — открытые 164
 — полужамкнутые 172
 — пресноводные 60, 92, 109, 132
 — солоноватоводные 71, 98

Скважины 181, 183
 — артезианские напорные 183
 Скорость крейсерская 80
 — роста 87
 — молоди большеротого окуня 85
 Содержание биогенных элементов 109
 — кислорода 95
 — фосфора 136
 Солемеры 35
 Соленость воды 33, 46, 49
 — океанических вод 71
 Сомик 102, 104
 — американский 82, 102, 103
 — кошка 25, 177
 Сооружения водосбросные 320
 Стерилизаторы 477
 Стратификация 61
 Сопла Вентури 234, 241
 Стресс осмотический 83
 — термальный 84, 85

Т

Темп прироста населения 12
 Температура акклимации 79
 — — двустворчатых моллюсков 83
 — воды 46, 49, 60
 — летальная 80
 — — трехглой колюшки 83
 Титрование 34
 Теплота плавления скрытая 36
 — парообразования скрытая 35
 Теплопроводность 41
 Термоклин 68
 Типы аэраторов 493
 Толерантность температурная 78
 Трубки Бурдона 195
 — Пито 243
 Турбонасосы регенеративные 284

У

Углерод 120
 Угорь 103
 Удобрение водоемов 170
 Уклейка 103
 Уловы возможные 24
 Управление открытыми системами 171
 Уровнемеры акустические 226
 — гидростатические 224
 — динамические 220
 — емкостные 226
 — оптические светочувствительные 222
 — поплавковые 219
 — пьезометрические 226
 — радионизотопные 228
 — тепловые 223
 — электрические 221
 Уровни кислорода критические 102
 Условия анаэробные 94, 129

Устрицы 166, 170
Устройства для прямого измерения расхода 229

Ф

Ферменты 76
Фермы устричные 75
Фильтры биологические 423, 429
— гравийные 438
— денитрификационные 452
— диатомовые 377, 382
— механические 352
— песчаные 360, 373
— растительные 453
— сетчатые вибрационного типа 360
— — вращающиеся 354
— — конвейерного типа 358
— — неподвижные 353
— угольные 402—404
— химические 395
Фитопланктон 21
Форель озерная 102
— радужная 103
Формы азота неорганические 131
Фосфор 126, 127, 136, 143, 146
Фотосинтез 55
Фракционирование пенное 410
Фьорды 72

Х

Хиборинхус 103
Хлорирование 463

Хлорность воды 34
Хлорофилл 57
Хозяйство рыбное 55
— сельское 14, 55

Ц

Цвет воды 48
Центрифуги отстойные 390
Циркуляция 60, 61, 74
— вертикальная 68, 69, 70
— ветровая 65
— горизонтальная 65, 67
— круговая 67

Ч

Чукучан 104

Ш

Шайнер 103

Щ

Щука красноперая 104

Э

Элементы биогенные 119
Энергия излучения 51
— солнечная 51, 52
Эримезон 102
Эрлифт 298, 301
Эстуарии 71, 73
Эффективность аквакультуры 28
— утилизации пищи 86

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие к русскому изданию	5
Предисловие к серии	8
Предисловие	9
Часть I. ПРИРОДНЫЕ ВОДНЫЕ СИСТЕМЫ	11
Глава 1. Аквакультура — перспективное направление развития рыбного хозяйства	11
Население	11
Потребности в продуктах питания	12
Сельское хозяйство	14
Рыболовство	19
Аквакультура	23
Глава 2. Свойства воды	31
Химическая структура	31
Жесткость	32
Соленость	33
Скрытая теплота парообразования	35
Скрытая теплота плавления	36
Удельная теплоемкость	37
Плотность	38
Вязкость	40
Теплопроводность	41
Поверхностное натяжение	42
Концентрация ионов водорода	43
Давление насыщенного пара	44
Осмотическое давление	45
Прозрачность	47
Цвет	48
Показатель преломления	49
Заключение	50
Глава 3. Энергия в водных системах	51
Энергия излучения	51
Термические характеристики	60
Пресноводные системы	60
Морские системы	64
Солоноватоводные системы	71
Влияние температуры на жизнь водных организмов	75
Глава 4. Кислород	90
Пресноводные системы	92
Морские системы	96
Солоноватоводные системы : : :	98
Значение кислорода в жизни водных организмов	99
Глава 5. Двуокись углерода и другие газы	105
Буферная система	105
Пресноводные системы	109

Морские системы	112
Солоноватоводные системы	113
Роль двуокиси углерода в жизнедеятельности водных организмов	114
Азот	116
Метан	117
Сероводород	117
Другие газы	118
Глава 6. Биогенные элементы в водных системах	119
Потребность в биогенных элементах	119
Круговорот биогенных веществ	123
Пресноводные системы	132
Морские системы	143
Роль биогенных элементов в существовании биологических систем	150
Взаимное влияние факторов природной среды	154
Продуктивность водных систем	156
Часть II. УСТРОЙСТВО СИСТЕМ ДЛЯ КУЛЬТИВИРОВАНИЯ ГИДРОБИОНТОВ	163
Глава 7. Виды систем	163
Открытые системы	164
Полузамкнутые системы	172
Замкнутые системы	173
Глава 8. Водоснабжение предприятий по культивированию водных организмов	175
Количество воды	176
Качество воды	177
Источники воды	180
Заключение	191
Глава 9. Жидкости	192
Гидростатика	193
Гидродинамика	200
Движение жидкости в открытом канале	210
Глава 10. Устройства для измерения расхода и уровня жидкости	218
Устройства для измерения уровня	219
Приборы для измерения расхода жидкости	229
Глава 11. Насосы	269
Определения и классификация насосов	269
Центробежные насосы	272
Погружные турбонасосы	280
Ротационные насосы	283
Насосы с возвратно-поступательным движением поршня	294
Эрлифты	298
Выбор насоса	305
Привод насоса	309
Глава 12. Пруды, бассейны и другие сооружения для содержания водных организмов	312
Пруды	312
Выростные каналы	328
Бассейны	331
Сетные ограждения	343
Глава 13. Фильтрация	352
Механические фильтры	352
Гравитационное разделение	383
Химические фильтры	395
Биологические фильтры	423
Денитрифицирующие фильтры	450

Растительные фильтры	453
Заключение	454
Глава 14. Способы дезинфекции воды	460
Хлорирование	463
Тепловая обработка	466
Ультрафиолетовое облучение	467
Озонирование	481
Глава 15. Аэрация	490
Газообмен	493
Типы аэраторов	514
Выбор аэратора	515
Аэрация замкнутых водоемов	490
Приложение	519
Предметный указатель	522

Фредрик Уорнер Уитон

ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ АКВАКУЛЬТУРЫ

Заведующая редакцией *Н. Г. Ланда*
 Редактор *Л. Л. Кожина*
 Художник *С. Н. Орлов*
 Художественный редактор *В. В. Зеркаленкова*
 Технический редактор *Н. Н. Зиновьева*
 Корректор *Е. А. Постникова*

ИБ № 587

Сдано в набор 24.08.84. Подписано в печать 09.10.85.
 Формат 60×90¹/₁₆. Бумага кн. журн. Литературная
 гарнитура. Высокая печать. Усл. п. л. 33 Усл. кр.-отт. 33.
 Уч.-изд. л. 37,62. Тираж 1450 экз. Заказ 1773.
 Цена 6 руб.

Ордена Трудового Красного Знамени
 ВО «Агропромиздат», 107807, ГСП, Москва,
 Б-53, ул. Садовая-Спасская, 18.

Московская типография № 6 Союзполиграфпрома при
 Государственном комитете СССР по делам издательств,
 полиграфии и книжной торговли, 109088, Москва,
 Ж-88, Южнопортовая ул., 24.