



УЧЕБНИК



КОМПЛЕКСНОЕ  
ИСПОЛЬЗОВАНИЕ  
ВОДНЫХ  
РЕСУРСОВ  
И ОХРАНА  
ПРИРОДЫ



---

УЧЕБНИКИ И УЧЕБНЫЕ ПОСОБИЯ  
ДЛЯ ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ



# КОМПЛЕКСНОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ВОДНЫХ РЕСУРСОВ И ОХРАНА ПРИРОДЫ

Под редакцией В. В. ШАБАНОВА, профессора,  
доктора технических наук

Допущено Главным управлением высших учебных заведений Министерст-  
ва сельского хозяйства и продовольствия Российской Федерации в качест-  
ве учебника для студентов сельскохозяйственных вузов по специальности  
3110 "Водное хозяйство и мелиорация"



МОСКВА · КОЛОС · 1994

ББК 38.77  
К63  
УДК 631.6.02:626.8(075.8)

Авторы: В. В. Шабанов, И. Г. Галямина, Э. С. Беглярова, Н. Ф. Юрченко

Редактор Н. М. Щербакова

Рецензенты: В. Н. Михайлов, докт. географических наук (МГУ), Б. Б. Пшумаков, докт. техн. наук (ОНК по гидротехнике и мелиорации)

Федеральная целевая программа книгоиздания России

К63 **Комплексное использование водных ресурсов и охрана природы**/В. В. Шабанов, И. Г. Галямина, Э. С. Беглярова и др. — М.: Колос, 1994. — 318 с.: ил. — (Учебники и учеб. пособия для студентов высш. учеб. заведений).

ISBN 5-10-001559-4.

Даны оценка водных ресурсов, их запасы и распределение по территории страны. Рассмотрены основные потребители воды, их особенности, требования к водным источникам и влияние на других водопотребителей. Освещены методы составления водохозяйственных балансов, водохозяйственные расчеты. Уделено внимание созданию водохозяйственных комплексов, их экономическому обоснованию и управлению. Рассмотрены вопросы охраны природы с основами экологии при мелиоративном и водохозяйственном строительстве.

Для студентов по специальности "Водное хозяйство и мелиорация".

К  $\frac{380200000 - 017}{035(01) - 94}$  КБ-44-7-93

ББК 38.77

ISBN 5-10-001559-4

© В. В. Шабанов, И. Г. Галямина, Э. С. Беглярова, Н. Ф. Юрченко, 1994

## ВВЕДЕНИЕ

Запасы вод территории, которые могут быть использованы для удовлетворения нужд населения и народного хозяйства, называют водными ресурсами. Составляя национальное природное богатство страны, водные ресурсы должны рассматриваться (Вендров, 1979) как социально-историческая категория. Так, главными водными ресурсами нашей страны являются воды речного стока, водохранилищ, озер. Отчасти используют пресные и слабоминерализованные грунтовые воды. С развитием техники опреснения и с расширением использования морских вод взамен пресных в состав используемых водных ресурсов войдут воды морей; по мере усовершенствования техники глубокого бурения – глубокие пресные воды. Ледники и снежники могут обеспечить регулируемую подачу воды в водоприемники с развитием технологии их таяния.

Со временем наступит черед более рационального использования почвенных вод избыточно увлажненных и заболоченных территорий, льдов Арктики и Антарктиды, вод Мирового океана, атмосферной влаги, химически связанной воды и ювенильных вод Земли.

**Значение воды в природе и в жизни человека.\*** Без преувеличения можно сказать, что значение воды в природе и жизни человека огромно. Прежде всего неопределимо биологическое значение воды.

Почти все физические и химические свойства воды являются исключениями (аномалии) в природе. Так, аномально высокая растворяющая способность воды имела важное значение для зарождения и развития жизни на Земле. До сих пор человек носит в своем теле следы морского происхождения, поскольку кровь человека по химическому составу очень близка к морской воде (табл. 1).

1. Относительное содержание растворенных химических элементов в воде океана и крови человека, %

|                | Химические элементы |      |                |     |     |        |
|----------------|---------------------|------|----------------|-----|-----|--------|
|                | Cl                  | Na   | O <sub>2</sub> | K   | Ca  | Прочие |
| Вода океана    | 55,0                | 30,6 | 5,6            | 1,1 | 1,2 | 6,5    |
| Кровь человека | 49,3                | 30,0 | 9,9            | 1,8 | 0,8 | 8,2    |

Кроме смягчения климата вода в течение многих миллионов лет формирует поверхность Земли.

Невозможно назвать другой природный ресурс, который бы столь разнообразно и широко применяли в хозяйстве, как вода. В хозяйственной деятельности человек использует все свойства воды, а именно: для растворения, очистки, транспорта, нагревания, охлаждения, получения энергии и т. д.

\* В написании раздела принимал участие С. А. Федоров

Велико и социальное значение воды. Являясь одним из компонентов природной среды, она необходима человеку не только как средство для решения экономических задач, но и для его здоровья, настроения и т. д. Обычно человек стремится отдохнуть около воды, так как последняя украшает любой ландшафт, дает возможность заняться различными видами физической культуры, благотворно влияет на здоровье, является неотъемлемой частью гигиены.

В большинстве случаев воду невозможно заменить никакой другой жидкостью или вообще другим веществом.

Без пищи человек может прожить довольно долго, а без воды он погибнет через несколько дней. Для поддержания жизни человек должен получать около 2,5 л воды в сутки. Эта вода необходима для кроветворения, пищеварения, обмена веществ, удаления шлаков, регулирования температуры тела и т. д.

Таковы же функции воды и в других животных организмах, которые тоже содержат воду в большом количестве.

Без воды не могут жить и растения, поскольку они более чем наполовину состоят из нее. Последняя является средой для физиологических реакций, проходящих в растениях: носителем питательных веществ, регулятором температуры и т. д.

Вода для многих животных и растений – среда обитания, а также необходимый компонент при образовании почвы.

Велико географическое значение воды. Аномально высокая теплоемкость воды приводит к тому, что океан регулирует климат Земли; аккумулируя тепловую энергию, отдает ее постепенно, что способствует смягчению, выравниванию климата. Это происходит потому, что соотношение теплоемкости воды и воздуха таково, что охлаждение стометрового слоя воды в океане на  $0,1\text{ }^{\circ}\text{C}$  приводит к нагреванию воздуха над ним на  $6\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

**Историческая необходимость экономного и рационального использования природных ресурсов.** Рост населения Земли, истощение природных ресурсов, отрицательные воздействия человека на окружающую среду, нехватка продуктов питания в ряде стран – вот проблемы, которые волнуют все человечество.

По словам великого русского ученого, одного из основоположников учения о биосфере, В. И. Вернадского «...человечество, как живое вещество, неразрывно связано с материально-энергетическими процессами определенной геологической оболочки Земли – с ее биосферой. Оно не может быть от нее независимым ни на одну минуту».

Система человек – окружающая среда стала настолько сложной, а все внутренние и внешние связи так многообразны, что локальные, непрогнозируемые воздействия на эту систему могут привести к самым неожиданным результатам.

Следовательно, необходим прогноз состояния биосферы при тех или иных направлениях развития мировой экономики.

Результаты прогнозов показали, что при существующих тенден-

циях использования природных ресурсов и при росте населения необходим значительный рост производства, который приведет к увеличению воздействия на окружающую среду.

Особое место среди всех природных ресурсов занимают водные. Это объясняется тем, что вода все более и более вовлекается в сферу производства – в сельское хозяйство и промышленность, коммунально-бытовое хозяйство, развитие мероприятий для отдыха и спорта, создание широкой сети лечебно-оздоровительных учреждений.

Потребление воды в народном хозяйстве превышает суммарное потребление всех видов ресурсов и продукции.

Удельное водопотребление в некоторых отраслях промышленности приведено ниже.

| Вид продукции          | Расход воды, м <sup>3</sup> /т |
|------------------------|--------------------------------|
| Уголь                  | 3...5                          |
| Нефть (переработка)    | 30...50                        |
| Сталь                  | 50...150                       |
| Чугун                  | 150...200                      |
| Бумага                 | 200...400                      |
| Химические удобрения   | 300...600                      |
| Хлопчатобумажные ткани | 300...1000                     |
| Синтетическое волокно  | 2500...5000                    |

Ожидается, что потребности основных хозяйственных секторов в воде в перспективе возрастут еще в несколько раз.

Рост водопотребления увеличит сброс сточных вод. Поэтому для защиты рек от загрязнения необходимо, по крайней мере, десятикратное разбавление даже очищенных сточных вод.

Таким образом, на данном историческом этапе развития человечества нормальное функционирование народного хозяйства возможно только в условиях планомерного управления добычей и расходованием природных ресурсов и утилизацией или захоронением отходов.

**Необходимость экологического подхода при комплексном использовании водных ресурсов.** Основная цель управления водными ресурсами – обеспечение народного хозяйства водой в необходимом количестве с заданным качеством при обязательном условии сохранения биосферы и недопущения вредных воздействий вод. Подход к управлению водными ресурсами, так как он является одним из основных элементов биосферы, должен быть экологическим, поскольку экология (наука об отношениях биологических объектов с окружающей средой) – научная основа рационального природопользования.

В устойчивых экологических системах всегда наблюдается замкнутый цикл использования основных ресурсов. Продукты жизнедеятельности одного организма являются пищей для другого. В связи с этим не происходит катастрофических загрязнений окружающей среды, биосенсы (совокупность живых организмов, характеризующихся определенными отношениями между собой и приспособлен-

ностью к условиям окружающей среды) функционируют достаточно продолжительное время, а все основные ресурсы, как правило, используются комплексно.

В природных системах путем естественного отбора создается такая совокупность потребителей и пользователей природными ресурсами, что не возникает ни истощения, ни загрязнения их.

Искусственные системы, использующие природные ресурсы, и в первую очередь воду, должны формироваться так, чтобы не создавать ни истощения, ни загрязнения воды.

Если в искусственной системе невозможно сделать, чтобы отходы одного предприятия служили сырьем для другого, то необходимо вводить в такую систему элементы, собирающие неиспользуемые отходы и утилизирующие их в других системах, или осуществлять захоронение отходов, т. е. изолировать их от биологического круговорота.

В нашей стране широко внедряется инженерно-экологическое направление водохозяйственной деятельности, решающее не только задачу водообеспечения, но и охрану водных и земельных ресурсов.

Наиболее распространенный пример реализации инженерно-экологического принципа в промышленном водоснабжении – создание водооборотных систем и систем повторного использования очищенных сточных вод.

В последние годы появились предприятия с замкнутыми системами.

**Системный подход к комплексному использованию водных ресурсов.** Комплексное использование водных ресурсов – синтетическая наука, объединяющая физико-химические, биологические, инженерные и социальные науки. При рассмотрении любого водохозяйственного проекта кроме необходимости чисто инженерных решений возникает целый ряд природоохранных и социологических проблем.

Таким образом, водохозяйственная система, которая включает мелиоративную систему как часть ее, состоит из множества элементов – подсистем, выполняющих разнообразные функции и связанных между собой. Связи эти сложны, функционирование всей системы нельзя описать суммой функционирования подсистем, поэтому такие системы называют сложными.

Отличительные особенности сложных систем – не только большое число входящих в нее элементов ( $10^4 \dots 10^7$ ), но и тесная взаимосвязь всех элементов и частей. Поэтому наиболее эффективно их можно изучить с позиции системного анализа (совокупность методологических средств, используемых для подготовки и обоснования решений по сложным проблемам политического, военного, социального, экономического, научного и технического характера). При проведении системного анализа описывают работу системы в целом и анализируют особенности функционирования всех компонентов системы, их взаимосвязи и внутреннее строение. Это означает, что взаимосвязь

отдельных элементов водохозяйственной системы необходимо учитывать как структурные части сложной системы и выявлять значение каждого из элементов в общем процессе функционирования всей системы.

Математический анализ водохозяйственных систем показывает возможности и условия совместной оптимизации структурных частей системы, а также системы в целом. Это обстоятельство особенно важно в связи с тем, что, принимая решение по частному вопросу, необходимо знать все прямые и косвенные, близкие по времени и отдаленные последствия этого решения.

Для водохозяйственной системы основную проблему представляет несоответствие имеющихся водных ресурсов и их качества перспективным запросам. Сформулировать эту проблему можно следующим образом: *разработать такую систему использования водных ресурсов, чтобы удовлетворить народное хозяйство в требуемом количестве воды заданного качества, не допуская отрицательного воздействия водохозяйственных систем и вод на природные комплексы.*

Далее в зависимости от масштабов системы комплексного использования и охраны водных и земельных ресурсов (часть бассейна реки, бассейн, несколько бассейнов, регион, страна) определяют границы системы, входы, выходы, важнейшие связи и составляют структуру исследуемой системы. Один из возможных видов такой структуры показан на рисунке 1. Ее можно рассматривать как отображение последовательности принятия решений при создании и функционировании системы комплексного использования и охраны водных ресурсов. Такая трактовка возникает из определения системного анализа как дисциплины, занимающейся проблемами принятия решений в условиях, когда выбор альтернатив требует анализа сложной информации различной физической природы.

Принятие решений при создании системы комплексного использования и охраны водных ресурсов (КИОВР) начинают с прогноза развития народного хозяйства (блок 1) для страны или региона, на который распространяется действие этой системы. На основе такого прогноза составляют прогноз развития водного хозяйства (блок 1.1), превращающийся в план, когда процесс принятия решений завершен. Прогнозом определяют предполагаемый состав участников водохозяйственного комплекса (ВХК) и объем производства. Зная объем производства, из производственных функций (зависимость конечной продукции или ее стоимости от использования конкретных видов ресурсов, представленная в математической форме) можно получить объемы водопотребления каждого участника ВХК  $S_i(V)$  (блок 2).

Назначение производства, его структура и технология определяют требования участников ВХК к качеству используемых вод  $S_i(V_k)$  (блок 2к).

Требования к количеству и качеству водных ресурсов должны быть сопоставимы с располагаемыми водными ресурсами.

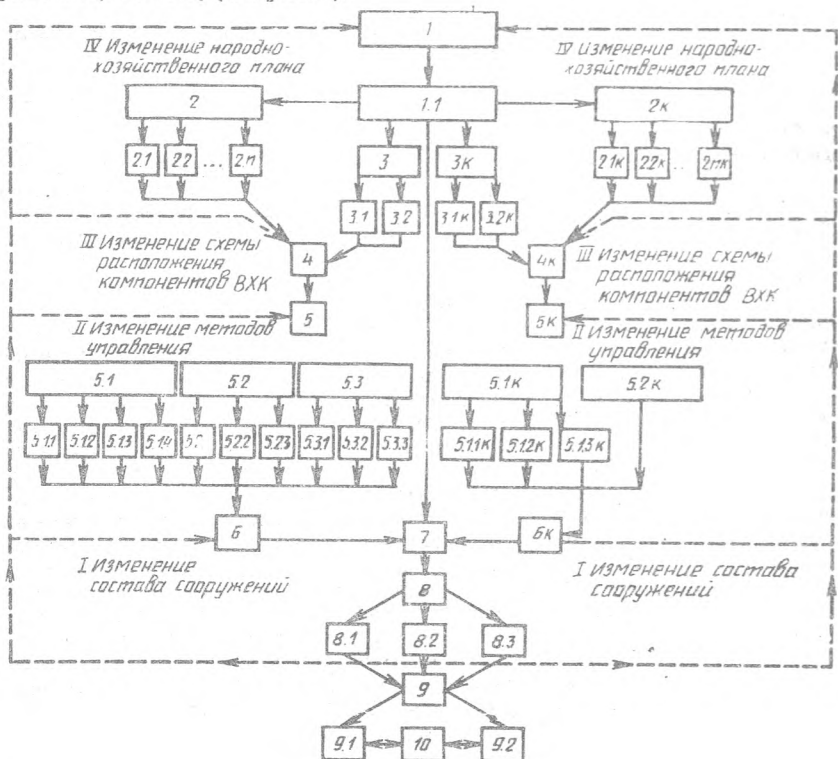


Поскольку на втором этапе системного анализа устанавливают границы рассматриваемой системы, то, зная их (часть бассейна, бассейн, регион), определяют объемы располагаемых водных ресурсов в пространстве и во времени  $V(x, y, t)$  и их качество  $V_k(x, y, t)$  (блоки 3 и 3к).

Требуемые объемы и качество водных ресурсов сопоставляют с располагаемыми с помощью водохозяйственных  $\pm \Delta V$  и гидрохимических  $\pm \Delta V_k$  балансов (блоки 4 и 4к).

Получаемые невязки балансов по абсолютной величине равны необходимым управляющим воздействиям, взятым с обратным знаком. Если в результате баланса получено  $-\Delta V$ , то необходимое управляющее воздействие будет  $+\Delta V$ .

Управляющие воздействия могут быть реализованы различными методами. Так, для количественной ветви схемы методы, реализующие управляющие воздействия  $U\{\pm \Delta V\}$ , разделены на три группы: экономия и рациональное использование водных ресурсов (блок 5.1), перераспределение поверхностного и подземного стока во времени (регулирование стока, блок 5.2), перераспределение стока в пространстве (блок 5.3) (см. рис. 1).



Управляющие воздействия на качественную составляющую системы  $U_{\kappa} \{ \pm \Delta V_{\kappa} \}$  (блок 5к) реализуются созданием оптимальных условий для самоочистки вод (блок 5.1к) и внедрением безотходных технологий (блок 5.2к), включающими различные способы управления балансами.

После принятия решений относительно методов и способов управления (блоки 5-го уровня) принимают решения о выборе технических средств, которыми можно осуществить методы управления, реализующие цели, поставленные перед водохозяйственным комплексом. Здесь также целесообразно рассматривать отдельно сооружения, управляющие количеством  $T\{U\}$  (блок б) и качеством  $T\{U_{\kappa}\}$  (блок 6к), хотя в ряде случаев одно сооружение может выполнять обе функции.

Этот уровень схемы представлен многочисленными гидротехническими сооружениями, в которые входят отраслевые сооружения, и в первую очередь мелиоративные.

Для принятия решений о выборе того или иного метода управления и набора технических средств (гидротехнических сооружений)

Рис. 1. Схема принятия решений в процессе создания и функционирования водохозяйственной системы:

1 — прогноз развития народного хозяйства; 1.1 — прогноз развития водного хозяйства; 2 — потребности в водных ресурсах  $S_i(V)$ ; 2.1, 2.2, ..., 2.n — потребности в водных ресурсах 1-го, 2-го, ..., n-го потребителей  $S_1(V)$ ,  $S_2(V)$ , ...,  $S_n(V)$ ; 2к — требования к качеству водных ресурсов  $S_i(V_{\kappa})$ ; 2.1к, 2.2к, ..., 2.nк — требования к качеству водных ресурсов 1-го, 2-го, ..., n-го участков ВХК  $S_1(V_{\kappa})$ ,  $S_2(V_{\kappa})$ , ...,  $S_n(V_{\kappa})$ ; 3 — располагаемые водные ресурсы  $V(x, y, \tau)$ ; 3.1 — поверхностные водные ресурсы; 3.2 — подземные водные ресурсы; 3к — качество водных ресурсов  $V_{\kappa}(x, y, \tau)$ ; 3.1к — поверхностные водные ресурсы; 3.2к — подземные водные ресурсы; 4 — водохозяйственный баланс  $\pm \Delta V$ ; 4к — гидрохимический баланс  $\pm \Delta V_{\kappa}$ ; 5 — методы управления запасов водохозяйственным балансом  $U(\pm \Delta V)$ ; 5.1 — экономия и рациональное использование водных ресурсов; 5.1.1 — внедрение безводных технологий и воздушного охлаждения в промышленности; 5.1.2 — внедрение оборотной и повторной систем водоснабжения, борьба с непроизводительными потерями; 5.1.3 — внедрение прогрессивных методов орошения в сельском хозяйстве; 5.1.4 — исключение отдельных водопотребителей; 5.2 — перераспределение стока во времени (регулирование стока); 5.2.1 — различные виды регулирования стоков в водохранилищах (неполное и полное годичное, многолетнее); 5.2.2 — агро- и лесотехнические мероприятия; 5.2.3 — искусственное восполнение запасов подземных вод; 5.3 — перераспределение стока в пространстве (территориальное); 5.3.1 — перераспределение стока внутри или же между бассейнами; 5.3.2 — создание единой водохозяйственной системы региона, страны; 5.3.3 — использование подземных вод другого бассейна; 5к — методы управления гидрохимическим балансом  $U(\pm \Delta V_{\kappa})$ ; 5.1к — самоочистка; 5.1.1к — искусственная аэрация потоков; 5.1.2к — охлаждение сточных вод; 5.1.3к — биологическая самоочистка; 5.2к — внедрение безотходной технологии; 6 — сооружения  $T(U)$ ; 6к — сооружения  $T_{\kappa}(U)$ ; 7 — ограничения по капиталовложениям, трудовым и материальным ресурсам; 8 — эффективность  $Эф(T)$ ; 8.1 — экономическая эффективность; 8.2 — экологическая эффективность; 8.3 — социальная эффективность; 9 — автоматизированная система управления водохозяйственной системой; 9.1 — эффективность управления материальными потоками (водораспределение); 9.2 — эффективность управления информационными потоками; 10 — лицо, принимающее решение

необходимо оценить эффективность каждого варианта водохозяйственной системы, сопоставив затраты с получаемым эффектом (блок 8) при соблюдении ограничений по капиталовложениям, трудовым и материальным ресурсам (блок 7).

Эффективность создания систем комплексного использования и охраны водных ресурсов может быть оценена не только по экономическому эффекту (блок 8.1), но и по экологическому (блок 8.2) и социальному (блок 8.3). По-видимому, значение последних двух форм эффективности со временем будет все более и более возрастать.

Если отобранный вариант удовлетворяет заданным критериям эффективности и не выходит за рамки ограничений, то переходят к следующему этапу – созданию управления системой КИОВР. Управление можно рассматривать как в обычном варианте, так и в автоматизированном режиме (блок 9). В этом случае АСУ ВХС состоит из двух частей – автоматизированной системы управления технологическими процессами АСУ ТП (блок 9.1) и автоматизированной системы процесса административного управления (блок 9.2).

В связи с тем что для такого сложного объекта, как водохозяйственный, невозможно создать систему, работающую полностью в автоматическом режиме, т. е. без участия человека, окончательное решение о создании той или иной структуры ВХС и решения в сложных ситуациях функционирования принимает человек (блок 10). Это обычно государственные органы или группа лиц, которую сокращенно обозначают ЛПР – лицо, принимающее решение.

АСУ в этом случае должно анализировать работу ВХС, рассчитывать возможные стратегии функционирования, управлять информационными потоками, т. е. облегчать исследование созданной системы.

Если в результате всесторонней оценки эффективности рассматриваемого варианта получены неудовлетворительные результаты, то необходимо пересмотреть принятые решения. На стадии создания системы в первую очередь пересматривают состав технических средств – сооружений, а на стадии эксплуатации изменяют порядок водораспределения. Этот процесс представлен первым уровнем обратной связи (пунктирная линия I, рис. 1). Если и в этом случае результаты не удовлетворяют критериям эффективности, то методы управления водохозяйственными и гидрохимическими балансами (второй уровень обратной связи – пунктирная линия II) пересматривают.

И в этом случае при получении неудовлетворительного результата пересматривают состав участников ВХК или схему расположения участников в пределах рассматриваемого района (обратная связь III).

Если результаты определения эффективности вновь неудовлетворительны, то необходимо рассмотреть возможность корректировки плана развития системы комплексного использования и охраны водных ресурсов и внести соответствующие изменения в требования к количеству и качеству водных ресурсов (обратная связь IV). При этом в крайнем случае приходится исключать из рассмотрения частич-

но или полностью отдельных участников водохозяйственного комплекса.

**Водные ресурсы и возможности их использования.** Общее количество воды на Земле, содержащееся во всех звеньях гидросферы в различном состоянии, оценивается в  $1,386 \cdot 10^9$  км<sup>3</sup>.

Почти 96,5 % мировых запасов вод – соленые воды океанов, которые практически не используются человечеством на питьевые нужды. Количество пресной поверхностной и подземной воды составляет 2,5 %, или 35 млн км<sup>3</sup>. Основная доля пресных вод (24 млн км<sup>3</sup>, или 68,7 %) сосредоточена в ледниках и снежном покрове Антарктиды и Арктики. Главными источниками обеспечения водой для большинства стран останутся реки и озера. Запасы воды в них не превышают 0,27 % ресурсов пресных вод и составляют 95 тыс. км<sup>3</sup>. Этого, может быть, и хватило бы человечеству при рациональном использовании, но вся сложность заключается в том, что водные ресурсы распределены чрезвычайно неравномерно по территории Земли. Наряду с зонами избыточного увлажнения, в которых количество осадков существенно превышает потенциальное испарение, существуют обширные территории, где количество осадков намного меньше потенциально возможного испарения. Такие зоны занимают около 60 % всей суши Земли, где проживает около 2 млрд чел. (около 30 %), а через 30...40 лет будет проживать до 3...3,5 млрд чел. (около 40 %). Таким образом, несмотря на значительные водные ресурсы на Земле, положение с водой будет все более и более напряженным.

В настоящее время в мире не существует государств, которые не испытывали бы трудностей в снабжении водой определенных территорий, в первую очередь густонаселенных.

Ниже приведены данные о степени достаточности водных ресурсов в странах – членах ЕЭК (Европейская экономическая комиссия включает страны Европы, США и Канаду).

| Степень достаточности   | Страны  |
|---|---|
| Водных ресурсов достаточно для удовлетворения текущих и будущих потребностей (до 2000 г.)   | Австрия, Бельгия, Германия, Ирландия, Исландия, Испания, Италия, Канада, Нидерланды, Норвегия, Португалия, Англия, США, Россия, Финляндия, Франция, Чехо-Словакия, Швейцария, Швеция, Югославия |
| Водных ресурсов достаточно для удовлетворения текущих потребностей, но они не смогут удовлетворить потребности, которые возникнут к 2000 г. | Болгария, Греция, Люксембург, Турция, Венгрия   |
| Водные ресурсы недостаточны для удовлетворения текущих потребностей   | Кипр, Мальта, Польша, Румыния   |

Количественно водные ресурсы описывают уравнениями водного баланса. Основные компоненты водного баланса: атмосферные осадки, выпадающие над океаном  $X_0$  и над сушей  $X_c$ , испарение с суши  $E_c$  и с

поверхности океанов  $E_o$ , приток воды в море из рек (сток)  $Y$ , который складывается из поверхностного и подземного стоков.

Поскольку запасы влаги на Земле (в Мировом океане и на суше) можно считать постоянными, уравнения водного баланса можно записать так:

для Мирового океана

$$X_o + Y = E_o; \quad (1)$$

для суши

$$X_c - Y = E_c. \quad (2)$$

В среднем за год, по данным А. А. Соколова,  $E_c = 72$  тыс. км<sup>3</sup>,  $E_o = 505$ ,  $X_c = 119$ ,  $X_o = 458$ ,  $Y = 47$  тыс. км<sup>3</sup>.

Составляющие мирового водного баланса приведены в таблице 2.

Уравнения водного баланса для части территории земного шара, бассейна реки или отдельного водного объекта более сложные, так как здесь необходимо учитывать изменения запасов подземных и почвенных вод, снега и льда, пара в атмосфере.

На территории бывшего СССР ежегодный суммарный сток рек составлял 4,74 тыс. км<sup>3</sup>, вековые запасы воды в озерах – 25,2 и в болотах – 1,68 тыс. км<sup>3</sup>. Кроме этого, в ледниках находилось еще 12,96 тыс. км<sup>3</sup> и в наледях 30 км<sup>3</sup>.

2. Годовой водный баланс земного шара

| Показатели                   | Земной шар | Мировой океан | Суша                       |                           |          |
|------------------------------|------------|---------------|----------------------------|---------------------------|----------|
|                              |            |               | область внешнего стока     | область внутреннего стока | вся суша |
| Площадь, млн км <sup>3</sup> | 510        | 361           | 119                        | 30                        | 149      |
| Осадки:                      |            |               |                            |                           |          |
| мм                           | 1130       | 1270          | 924                        | 300                       | 800      |
| тыс. км <sup>3</sup>         | 577        | 458           | 110                        | 9                         | 119      |
| Испарение:                   |            |               |                            |                           |          |
| мм                           | 1130       | 1400          | 529                        | 300                       | 485      |
| тыс. км <sup>3</sup>         | 577        | 505           | 63                         | 9                         | 72       |
| Сток (приток в океан):       |            |               |                            |                           |          |
| поверхностных вод            |            |               |                            |                           |          |
| мм                           | –          | 124           | 376                        | –                         | 300      |
| тыс. км <sup>3</sup>         | –          | 44,7          | 41,7 – реки<br>3 – ледники | –                         | 44,7     |
| подземных вод                |            |               |                            |                           |          |
| мм                           | –          | 6             | 19                         | –                         | 15       |
| тыс. км <sup>3</sup>         | –          | 2,2           | 2,2                        | –                         | 2,2      |
| общий                        |            |               |                            |                           |          |
| мм                           | –          | 130           | 395                        | –                         | 315      |
| тыс. км <sup>3</sup>         | –          | 47            | 47                         | –                         | 47       |

**Поверхностные воды.** Для хозяйственной деятельности человека наибольшее значение имеют интенсивно возобновляемые *речные воды* ( $\tau_{\text{возоб}} = 12$  сут). Реки имеют огромную суммарную протяженность и пересекают территории стран, доставляя воду в самые отдаленные районы. Поэтому они незаменимые водные источники для хозяйственных нужд.

На территории бывшего СССР 2870 тыс. рек, ручьев и временных водотоков длиной больше 0,5 км. Среднемноголетние возобновляемые водные ресурсы рек составляют 4740 км<sup>3</sup> в год. Они формируются из поверхностных (78 %) и подземных (22 %) вод. Сток с территории, занимающей 22 275 тыс. км<sup>2</sup>, составляет 4413 км<sup>3</sup> в год.

Модуль поверхностного стока равен 6,3 л/(с·км<sup>2</sup>). В среднем страны СНГ удовлетворительно обеспечены водой, но в дальнейшем поверхностный сток может снизиться.

Кроме этого, сток распределен крайне неравномерно. Большая часть речных вод (86 %) поступает с территории избыточно увлажненных северных и восточных районов в бассейны Северного Ледовитого (64 %) и Тихого (22 %) океанов. Такие реки, как Енисей, Лена, Обь и Амур, выносят 44 % вод, и только 14 % стока приходится на западные и южные районы.

По степени водообеспеченности страны СНГ расположены в трех зонах: избыточно увлажненной (северные, восточные и горные районы), занимающей 48 % площади и имеющей 80 % водных ресурсов; среднеобеспеченной водой, соответственно 25 и 18 %; недостаточного увлажнения 27 и 2 %.

Водообеспеченность разных стран составляет, тыс. м<sup>3</sup>/км<sup>2</sup> в год: Грузия – 765, Таджикистан – 331, Кыргызстан – 275, Латвия – 238, Эстония – 241, Литва – 196, Россия – 235, Беларусь – 164, Азербайджан – 90, Украина – 85, Узбекистан – 21, Казахстан – 11, Туркменистан – 2.

Суммарный сток по территории России от года к году сравнительно постоянен, но в отдельных районах и бассейнах рек колебания его во времени значительны. Поэтому необходимо создание единой водохозяйственной системы России для оперативного перераспределения стока между регионами.

В зонах избыточного увлажнения сток рек в маловодные годы составляет 60...70 % среднего многолетнего, в многоводные увеличивается до 135...150 %, а недостаточного увлажнения соответственно 3...4 % и 300...400 %. Поэтому требуется накопление воды в многоводные годы (в водохранилищах) для расходования ее в маловодные. Аккумулятивное стока необходимо еще и потому, что в зоне недостаточного увлажнения маловодные годы группируются в периоды продолжительностью от 2 до 8 лет, а многоводные – в 2...3 года.

Возобновляемый сток рек составляет только 10,5 % общих запасов пресных вод, сосредоточенных в озерах, болотах, ледниках, снежном покрове, наледях и в подземных водах. Из всех стран ЕЭК только

Канада имеет такой уровень обеспеченности водными ресурсами, как Россия.

Водные ресурсы озер для водоснабжения промышленности и населения используются незначительно и служат в основном как транспорт, для рыбного хозяйства, а также в рекреационных целях.

В будущем в маловодные годы возможно увеличение безвозвратного изъятия водных ресурсов озер. Однако, учитывая, что озеро – это сложившаяся экологическая система, даже незначительные понижения уровней могут привести к необратимым экологическим изменениям. Поэтому изъятие вод из озер возможно только при обосновании народнохозяйственной целесообразности, обязательным возвращением этих вод в озера в многоводные годы и оценке в каждом конкретном случае вероятности необратимых экологических последствий.

На территории бывшего СССР расположено 2 млн 815 тыс. озер, из них 95 % имеют пресную воду. Площадь зеркала озер примерно 550 тыс. км<sup>2</sup>, или 2 % территории страны. Общий объем воды в озерах бывшего СССР составляет около 26 тыс. км<sup>3</sup>, в том числе 91 % пресных; 85 -- соленых (в мире 176 тыс. км<sup>3</sup>), или 15 % запасов озерных вод мира. Большинство озер (98 %) небольшие (менее 1 км<sup>2</sup>) и мелководные (глубина 1...1,5 м).

Почти все запасы вод находятся в 16 наиболее крупных озерах. Так, объем озера Байкал – 23 тыс. км<sup>3</sup> (51 % всех пресных вод бывшего СССР) – в 5 раз превышает суммарный годовой сток всех рек бывшего СССР.

Запасы воды в наиболее крупных озерах составляют, тыс. км<sup>3</sup>: Байкал – 23, Иссык-Куль – 1,74, Ладога – 0,91, Онежское – 0,3, Балхаш – 0,11, Севан – 0,03.

Ежегодное возобновление воды в озерах незначительное – от 1,5 % в мелких озерах до 0,3 % в крупных. Время полного возобновления воды в озерах в среднем 100 лет, но у разных озер оно сильно варьирует.

Болота занимают значительную часть территории в Западной Сибири (50...70 %) и на северо-западе европейской территории (40 %). Средняя мощность торфяников – 4,5 м, а общий объем – 3 160 км<sup>3</sup>. Учитывая малую плотность торфа, нетрудно подсчитать, что вода занимает в торфе около 95 % объема, поэтому суммарный запас болотных вод составляет 3000 км<sup>3</sup>, а в активном слое 1,7...1,8 м – 1,17 тыс. км<sup>3</sup>. Из них около 1 тыс. км<sup>3</sup> приходится на болота Западной Сибири.

Использование вод болот возможно при осушении (норма осушения 1 м) – одноразовой сработке вековых запасов, но даже в этом случае объем воды составит около 0,67 тыс. км<sup>3</sup>, а объем стока – приблизительно 1/4 этого объема, т. е. 167 км<sup>3</sup>. Учитывая, что вековые запасы можно сработать только один раз и что при этом возможны отрицательные экологические изменения болот, особенно верхового типа, использовать болотные воды не всегда целесообразно.

Большие запасы пресных вод аккумулированы в *ледниках*, которые расположены на островах Северного Ледовитого океана и в горных районах. Общий объем воды в ледниках бывшего СССР составляет 13 тыс. км<sup>3</sup>, из них 91 % – арктические ледники и 9 % – ледники горных районов.

Большое практическое значение имеют ледники горных районов, так как они и формируют основную часть стока горных рек.

В горных районах расположено 26,65 тыс. ледников площадью 22,74 тыс. км<sup>2</sup>. В годовом водообороте участвует незначительная часть ледниковых вод. Большую часть составляют вековые запасы.

Возможности более интенсивного использования запасов воды в ледниках путем ускорения их таяния в настоящее время находятся в стадии исследований, так как неизвестны климатические изменения, которые могут произойти после этих воздействий. При этом следует учесть, что период возобновления водных запасов ледников около 16 тыс. лет.

В районах многолетней мерзлоты относительно большое количество воды аккумулировано в *наледях*, образующихся вследствие замерзания подземных вод при выходе их на поверхность земли. Площади отдельных наледей доходят до 100 км<sup>2</sup>, а объемы – до 0,6...6 км<sup>3</sup>.

На северо-востоке России зарегистрировано 7,5 тыс. наледей суммарным объемом около 30 км<sup>3</sup>. Талые воды наледей составляют 30...50 % годового стока ряда рек северо-востока России.

**Подземные воды.** Это наиболее устойчивый источник пресных вод, пригодных по своей чистоте для питьевого водоснабжения.

Несмотря на то что использование подземных вод более сложно, чем поверхностных, широкое распространение их и значительные запасы позволяют использовать подземные воды в качестве незаменимого источника водообеспечения.

На формирование подземных вод влияют климат, рельеф и структурно-гидрогеологический фактор.

Ресурсы подземных вод зоны интенсивного водообмена на территории бывшего СССР оцениваются в 1,04 тыс. км<sup>3</sup> в год (280 км<sup>3</sup> в год европейская и 758 км<sup>3</sup> в год азиатская часть), что составляет около 22 % общего речного стока. Общий объем пресных и засоленных подземных вод, находящихся в осадочной толще, составляет 15 млн км<sup>3</sup>, а пресных (до глубины 200 м) – 2...3 млн км<sup>3</sup>.

Особое значение для народного хозяйства имеют *термальные воды*. По предварительным расчетам, дебит эксплуатационных запасов вод с глубиной залегания до 3,5 км и температурой 40...200 °С оценивают в 7,9 млн м<sup>3</sup>/сут. На глубине 7...15 км находятся еще более горячие подземные воды с температурой 200...350 °С. По-видимому, для энергетики будущего использование таких вод представляет особый интерес.

Выше рассмотрены в основном общие запасы подземных вод. Однако наибольший интерес представляют эксплуатационные ресурсы,



т. е. те, которые могут быть получены рациональными в технико-экономическом отношении сооружениями без ухудшения эксплуатационного режима и качества воды.

### *Контрольные вопросы и задания*

1. Почему водные ресурсы являются социально-исторической категорией?
2. Каковы главные источники обеспечения пресной водой большинства стран на современном этапе?
3. Почему при рассмотрении любого водохозяйственного проекта целесообразно использовать системный подход?

---

# КОМПЛЕКСНОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ВОДНЫХ РЕСУРСОВ

## Глава 1

### ПЛАНИРОВАНИЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ВОДНЫХ РЕСУРСОВ

#### 1. ВОДОБЕСПЕЧЕНИЕ НАРОДНОГО ХОЗЯЙСТВА

Для правильного определения потребностей в воде необходимо иметь прогноз развития всех участников водохозяйственного комплекса (ВХК) на перспективу (15...20 лет). Учитывая, что суммарные объемы воды всегда связаны с объемом продукции, необходимо в первую очередь уметь определять на перспективу тот объем продукции, выпуск которой ожидается в ближайшем и отдаленном будущем.

В свою очередь, необходимый объем промышленной и сельскохозяйственной продукции зависит от роста населения, структуры и уровня потребления, т. е. уменьшения или увеличения спроса на те или иные продукты производства.

Основой развития производства в любой стране на перспективу является долговременная экономическая политика государства, основанная на использовании результатов научно-технического прогресса, совершенствовании методов управления и планирования в народном хозяйстве и всесторонней интенсификации производства.

Главная социально-экономическая задача развития народного хозяйства в России – более полное удовлетворение общенародных духовных и материальных потребностей на базе рационального развития производительных сил при условии сохранения и воспроизводства природных комплексов.

В связи с тем что задачи социально-экономического развития должны решаться в учете перспективного роста населения, в первую очередь прогнозируют его увеличение. Характер роста населения линейный.

Увеличение производительности труда и рост капиталовложений в прогрессивные технологии должны привести к увеличению валовой продукции промышленности и сельского хозяйства и к росту национального дохода.

Рост полного потребления воды в промышленности показан на рисунке 2.

Объем валовой продукции в сельском хозяйстве может расти менее интенсивно, чем в промышленности. Однако, учитывая, что сельское хозяйство является основным водопотребителем и на его долю приходится около 50 % всего объема водозабора, даже сравнительно небольшое увеличение валовой продукции сельского хозяйства может значительно повысить водопотребление.

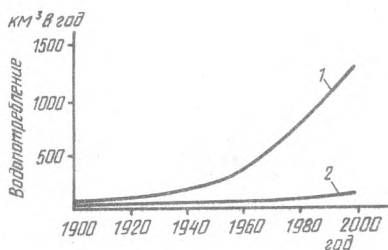


Рис. 2. Водопотребление в промышленности:

1 — полное; 2 — безвозвратное

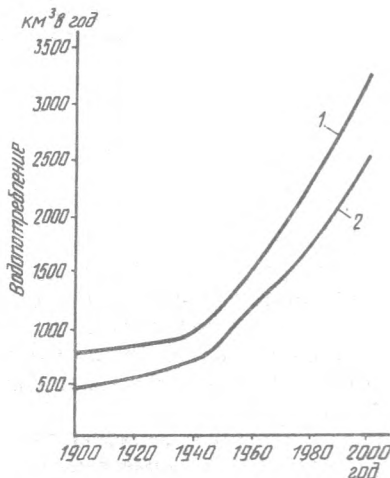


Рис. 3. Полное (1) и безвозвратное (2) потребление воды в сельском и рыбном хозяйстве

Тенденция увеличения полного и безвозвратного водопотребления в сельском хозяйстве показана на рисунке 3. Полное водопотребление сельского хозяйства в 1,5 раза больше, чем в промышленности.

Развитие промышленности и сельского хозяйства в современных условиях невозможно без значительных энергетических затрат. Поэтому в соответствии с гипотезой долгосрочного развития нашей страны должна развиваться энергетика. Пока основным направлением развития энергетики во всем мире и в нашей стране является увеличение мощности тепловых и атомных электростанций.

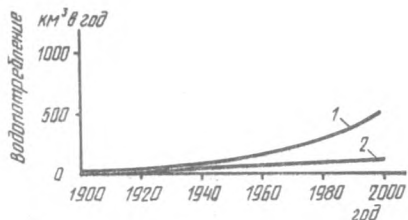
При любом направлении развития атомных и тепловых электростанций энергетический комплекс не сможет оптимально функционировать без гидроэлектростанций (ГЭС), являющихся практически единственным источником оперативно управляемой мощности и позволяющих покрывать резкое изменение потребной энергии в течение суток.

Развитие всех видов производства электроэнергии в развитых странах отражает развитие промышленности и сельского хозяйства — это обстоятельство также влияет на водное хозяйство как на одну из ведущих отраслей, обеспечивающих энергетику.

Рост населения и повышение степени благоустройства жилищ приводит к росту водопотребления и в коммунальном хозяйстве (рис. 4).

Для того чтобы получить данные по прогнозу водопотребления в промышленности и сельском хозяйстве, в гипотезе развития народного хозяйства подробно рассматривают объемы производства важнейших видов продукции, к которым относятся нефть, уголь, железная руда, сталь, чугун, продукция пищевой и легкой промышленности, производство химического волокна, синтетических смол, бумаги и

Рис. 4. Полное (1) и безвозвратное (2) водопотребление в коммунальном хозяйстве



другой продукции. Для удовлетворения запросов населения и промышленности в продукции сельского хозяйства в гипотезе развития народного хозяйства также подробно изучают тенденции роста основных видов сельскохозяйственной продукции: зерна, кормов, молока, сахарной свеклы, мяса, овощных и бахчевых культур, хлопка.

### 1.1. Зависимости, описывающие тенденции изменения прогнозных показателей

Для описания общих закономерностей развития народного хозяйства используют математические модели развития. Модель в широком понимании — некий образ объекта, интересующий исследователя. Под моделированием понимают исследование объектов познания не непосредственно, а косвенно, при помощи анализа некоторых вспомогательных объектов. Их применяют для анализа исходных основных объектов и называют моделями, которые выбирают (строят) таким образом, чтобы они были значительно проще для исследования, чем рассматриваемые явления. В них воспроизводят лишь некоторые наиболее важные в данном исследовании стороны исходного объекта. Поэтому моделирование позволяет выявить в первую очередь самые существенные факторы, ответственные за те или иные свойства изучаемого объекта.

При решении водохозяйственных задач используют как материальное (физическое, аналоговое), так и идеальное моделирование, основанное не на материальной аналогии моделируемого объекта и модели, а на аналогии идеальной, мыслимой.

Один из видов идеального моделирования — знаковое (формализованное) моделирование. В нем моделями служат схемы, графики, чертежи, формулы и т. д. Важнейшим знаковым моделированием является математическое, осуществляемое средствами языка математики и логики.

Тенденции развития народного хозяйства на перспективу в первом приближении можно описать на основе моделей, используемых в прогнозировании социально-демографических процессов.

В зависимости от особенностей экономического развития страны тенденции изменения экономических и демографических показателей могут быть описаны различными моделями.

Общую группу количественных закономерностей изменения экономических и демографических показателей называют параболическими законами роста. Математически это можно записать так:

$$d^n y / d \tau^n = k y^m, \quad (3)$$

где  $n$  — порядок ускорения роста;  $y$  — прогнозируемый показатель на момент времени  $\tau$ ;  $k$  — коэффициент пропорциональности;  $m$  — порядок константы скорости роста.

При  $m = 0$  состояние системы стационарное:

$$d y / d \tau = 0; y = \text{const}, \quad (3a)$$

т. е. прогнозируемый показатель не растет.

Линейному закону изменения прогнозируемого показателя соответствует постоянная скорость роста:

$$d y / d \tau = k; y = k (\tau - \tau_0) + y_0, \quad (4)$$

где  $k$  — скорость роста;  $y$  и  $y_0$  — прогнозируемый показатель на моменты времени  $\tau$  и  $\tau_0$ .

Уравнениями линейного типа можно описать рост сельскохозяйственной продукции, а также увеличение производства железной руды, стали, чугуна, цемента, в первом приближении — нефти.

Однако ряд показателей более точно можно описать нелинейными моделями. В развивающихся странах многие показатели хозяйственной и демографической деятельности описывают экспоненциальными законами.

Квадратический закон изменения прогнозируемой величины  $y$ :

$$d^2 y / d \tau^2 = \alpha; y = \alpha (\tau - \tau_0)^2 - y_0. \quad (5)$$

Общая формула перечисленных выше законов

$$y = a_n (\tau - \tau_0)^n + y_0, \quad (6)$$

где  $a_n$  — скорость или ускорение соответствующего порядка;  $\tau$ ,  $\tau_0$  — начальные моменты;  $y_0$  — показатель в начальный момент.

Зная законы изменения тенденций того или иного параметра (численности населения, объемов различных видов продукции) и удельные расходы воды на одного жителя и единицу продукции, можно определить перспективный объем необходимых водных ресурсов во всем мире, в каждой стране, рассматриваемом регионе или бассейне.

Для перехода от потребностей на мировом уровне к потребностям в водных ресурсах страны рассмотрим, как увязываются цели и задачи страны с требованиями обеспечения водными ресурсами.

Зная нормы водопотребления и водоотведения по каждому виду продукции и объемы производства, рассчитывают их водопотребление. Суммируя его, получают общее водопотребление в промышленности и сельском хозяйстве. При этом следует учесть определенное количество воды, необходимое для рыбного хозяйства, транспорта,

для разбавления стоков, спортивных мероприятий, отдыха и сохранения природных комплексов.

Из анализа зависимостей прогнозируемых показателей видно, что это линейно или нелинейно изменяющиеся функции. По-видимому, вид этих функций зависит от того, на каком этапе экономического развития находится страна.

При составлении схем комплексного использования водных ресурсов и для более детального анализа изменения соотношений между потребностью и наличными водными ресурсами бывает необходимо знать прогнозируемые показатели не только через 5 или 10 лет, а ежегодно. Тогда более удобно представить прогнозные зависимости в аналитическом виде. В более общем случае прогнозируемые показатели можно получить из математических моделей рассматриваемых процессов.

## **1.2. Граф целей и задач на уровне страны, приведенный к решению проблемы водообеспечения**

Место водного хозяйства в общей системе целей и задач, стоящих перед обществом, показано на схеме (графе) (рис. 5). Этот граф построен так, что цели самого верхнего (нулевого) уровня являются конечными, а самого нижнего уровня можно решать на основе имеющихся ресурсов.

Первый уровень в системе целей состоит из задач, которые необходимо решать для успешного развития общества в целом. На втором уровне выделены лишь те цели, которые связаны с рациональным водопользованием.

На третьем и четвертом уровнях выделены только задачи, непосредственно связанные с обеспечением водопотребления. Таким образом, сформирован граф целей, доводящий до уровня задач обеспечение водными ресурсами. Благодаря такому подходу удается качественно описать требования, предъявляемые к системе снабжения водой как в настоящее время, так и в перспективе.

При совместном рассмотрении вариантов социально-экономического развития страны в целом выявляются и потребности в природных, в частности водных, ресурсах.

## **2. ВОДНОЕ ХОЗЯЙСТВО И ВОДНОЕ ЗАКОНОДАТЕЛЬСТВО**

### **2.1. Водное хозяйство и его функции**

Рациональное управление количеством и качеством водных ресурсов в народном хозяйстве должно осуществляться в соответствии с едиными требованиями и нормами, четкой системой управления. Эти задачи возлагают на водное хозяйство страны.

*Водное хозяйство* – отрасль науки и техники, охватывающая изучение, учет, использование и охрану водных ресурсов, а также борьбу с вредным их воздействием.

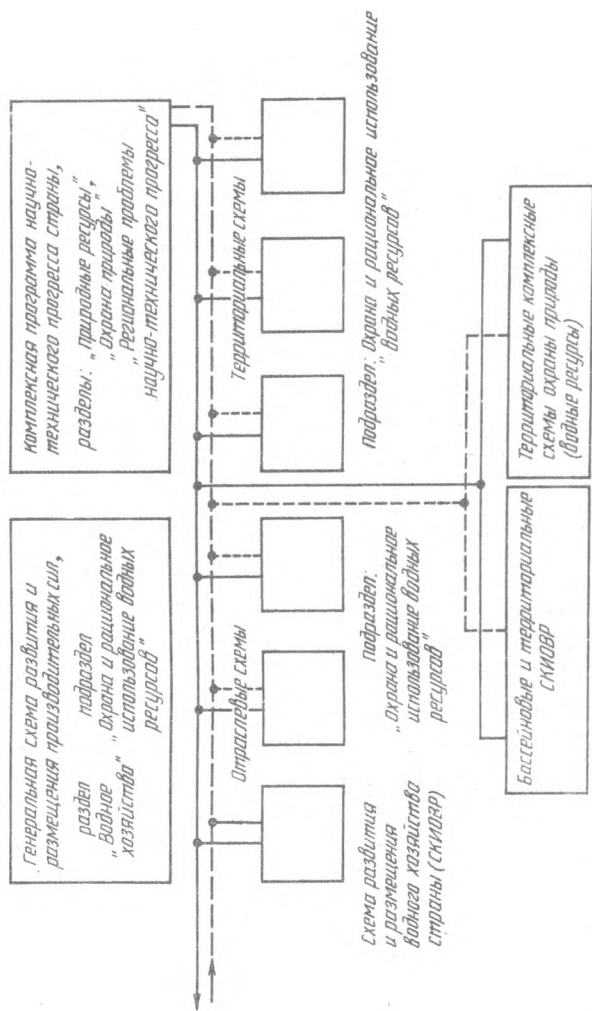


Рис. 6. Принципиальная схема разработки предплановых материалов по использованию и охране водных ресурсов (Водное хозяйство, 1988)

Использование водных ресурсов в народном хозяйстве страны в современных условиях не может быть четко организовано без всестороннего государственного изучения и учета. Необходимо точно знать, где и в каком объеме и какого качества требуются водные ресурсы, каков объем возвратных вод, а также то количество природных водных ресурсов, на которое можно рассчитывать в каждом рассматриваемом районе. Определить количество и качество располагаемых водных ресурсов в различных речных бассейнах позволяют постоянные гидрологические и гидрохимические наблюдения. Предсказать объемы и качество водных ресурсов можно, используя методы, разработанные в рамках таких наук, как гидрология, гидравлика, комплексное использование и охрана водных ресурсов. Надежная работа любого водохозяйственного объекта зависит от того, насколько правильно удалось предсказать изменение объема стока и качества вод.

Большая часть воды, использованной в технологических процессах (на охлаждение, промывку и т. д.), возвращается в водные объекты сильно загрязненной или повышенной температуры. Кроме того, активная хозяйственная деятельность людей на обширных территориях речных бассейнов, связанная с вырубкой лесных массивов, осушением земель, использованием поверхностных и подземных вод, приводит к истощению водных ресурсов. Все это заставляет проводить планомерную и целенаправленную работу по охране вод от загрязнения и истощения.

Вода может приносить не только пользу. Вредное воздействие вод, связанное с наводнениями, деформациями русел, берегов рек, озер, водохранилищ и каналов, разрушением, смывом или занесением плодородных земель, водной эрозией почв, а также селевыми потоками, наносит немалый вред народному хозяйству.

Поэтому в соответствии с определением основными функциями органов управления водным хозяйством являются:

- водообеспечение населения и народного хозяйства водными ресурсами на основе их комплексного использования;

- управление и контроль количества и качества водных ресурсов,

- включая организацию диспетчерских и инспекторских служб;

- распределение водных ресурсов между регионами;

- выдача технических условий на все виды водопользования;

- эксплуатация водохозяйственных объектов комплексного назначения;

- ведение государственного учета и водного кадастра;

- реализация мероприятия по воспроизводству, сохранению и улучшению экологического состояния рек, озер, водохранилищ и прибрежных зон морей;

- введение и совершенствование механизма платного водопользования;

- проведение экосистемной научно-технической и инвестиционной политики;



координация производства и ремонта водоизмерительной техники, организация мониторинга и создание автоматизированных систем управления на водных объектах.

Кроме того, на Комитет по водным ресурсам России (Роскомвод) возложены функции заказчика на разработку схем комплексного использования и охраны водных ресурсов (КИОВР), на проведение научно-исследовательских, опытно-конструкторских работ и строительство объектов межотраслевого и межрегионального назначения.

Принципиальная схема разработки предплановых материалов показана на рисунке 6.

Все перечисленные функции тесно связаны между собой. Так, для нужд коммунально-бытового хозяйства, отдельных производств промышленности требуется вода достаточно высокого качества. Использование загрязненной воды может отрицательно сказаться на здоровье людей, ухудшить качество производимой продукции. Вероятность наводнений, селевых потоков, изменение плановых очертаний русел рек угрожают жизни людей, материальным ценностям и, таким образом, ставят под сомнение целесообразность хозяйственной деятельности в районах, подверженных вредному воздействию вод, без специальных мероприятий по их предотвращению или защите от них.

Функции водного хозяйства реализуются с помощью различных водохозяйственных и гидротехнических объектов межотраслевого и отраслевого назначения, водохозяйственных комплексов, систем и агро- и лесотехнических мероприятий.

К сооружениям, обеспечивающим охрану водных ресурсов от загрязнения, могут быть отнесены различные стационарные или передвижные очистные сооружения (региональные, городские, отдельных предприятий и животноводческих комплексов), земледельческие поля орошения. В отдельных случаях можно создавать специальные водоохраные водохозяйственные комплексы. Комплекс агро- и лесотехнических мероприятий (правильное расположение и обработка сельскохозяйственных земель, ограничение выпаса скота в речных долинах, сохранение существующих и создание новых лесных массивов в бассейнах рек) проводят для охраны вод от истощения. При этом надо помнить, что любые мелиоративные мероприятия, выполняемые на водосборах малых и крупных рек, должны сопровождаться минимальными ущербами для водных объектов. Запрещено, например, осушение верховых болот и пр.

Водообеспечение отраслей народного хозяйства связано с созданием водохранилищ комплексного и отраслевого назначения, сооружений для территориального перераспределения стока, различных по размерам распределительных каналов, мелиоративных систем, водопроводных сетей для снабжения водой промышленных объектов и населенных пунктов, объектов рыбного хозяйства, судоходства, рекреационного назначения и многих других.

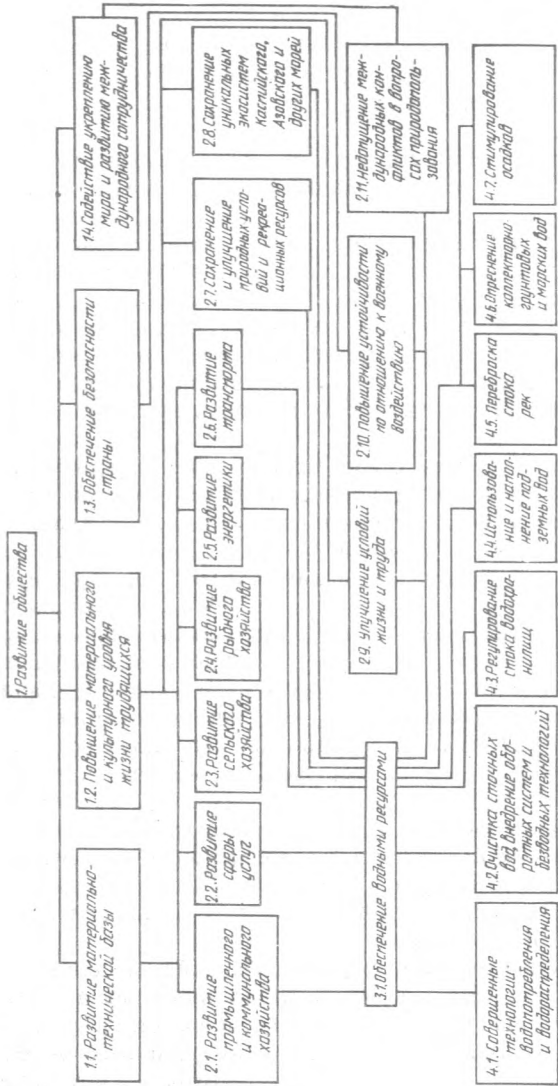


Рис. 5. Граф целей и задач на уровне страны, приведенный к решению проблемы водообеспечения

Особое внимание при этом уделяют рациональному и экономному использованию водных ресурсов. Поэтому все шире внедряют системы оборотного и повторного водоснабжения в промышленности. Такое использование вод превышает 70 %.

В сельском хозяйстве применяют прогрессивные методы орошения (дождевание, капельное), оптимизации распределения оросительной воды в период вегетации.

Для борьбы с вредным воздействием вод в первую очередь сооружают водохранилища, защитные дамбы, а также проводят агро- и лесотехнические мероприятия.

## 2.2. Государственное управление водным хозяйством в России

Успешное решение всех задач, возложенных на водное хозяйство страны, во многом зависит от работы системы централизованных органов управления.

Государственное управление водным фондом и водными отношениями на территории Российской Федерации осуществляется на основе экосистемного подхода по бассейновому принципу с учетом соблюдения интересов всех субъектов Федерации и водопользователей. При этом обеспечивается приоритет задач сохранения экологической устойчивости и восстановления водных объектов, рационального использования, воспроизводства и улучшения качества их.

Рациональное водопользование и обеспечение водохозяйственных отношений возможно в соответствии с бассейновым соглашением государственного органа по управлению водным фондом и субъектов Федерации.

Управление использованием и охраной водного фонда заключается в планировании, учете и контроле и возложено на правительство Российской Федерации, органы власти субъектов Федерации, государственные органы управления водным фондом и других уполномоченных на то государственными органами. Они отвечают за обеспечение потребностей населения и народного хозяйства в качественных водных ресурсах.

Органы управления водным фондом представлены федеральным органом, его бассейновыми и территориальными подразделениями.

В компетенцию их входит:

разработка совместно с субъектами Федерации предложений по совершенствованию водного законодательства России;

прогнозирование и разработка стратегии использования, воспроизводства, восстановления и охраны водного фонда, предупреждения и ликвидации последствий вредного воздействия вод, стихийных бедствий и аварий на водных объектах и их водоохраных зонах;

управление использованием, восстановлением и охраной водных объектов, имеющих международное и федеральное значение;

проведение единой научно-технической и инвестиционной политики в области рационального использования, воспроизводства и охраны водного фонда;

координация деятельности субъектов Федерации, отраслей хозяйства, юридических и физических лиц в области использования, восстановления и охраны государственного водного фонда;

разработка нормативных документов, определяющих порядок и правила использования и охраны государственного водного фонда, государственного контроля и учета вод;

организация мероприятий по восстановлению, воспроизводству и охране водного фонда, предупреждению и ликвидации последствий вредного воздействия вод, аварий и стихийных бедствий на водных объектах и в их водоохраных зонах;

установление лимитов водопотребления и водоотведения, выдача разрешений (лицензий) на пользование водным фондом и проведение работ на водных объектах и в их водоохраных зонах;

осуществление функций заказчика на разработку программ и схем комплексного использования и охраны водного фонда, государственного водного кадастра и водохозяйственных балансов, проведение научно-исследовательских и проектных работ, строительство и эксплуатацию водохозяйственных объектов комплексного назначения, проведение других работ общего назначения, связанных с благоустройством, очисткой и восстановлением водного фонда;

утверждение порядка и правил использования водных ресурсов и эксплуатации водохранилищ и водных систем;

организация мониторинга вод, ведение государственного учета вод и Государственного водного кадастра;

разработка предложений по порядку и условиям взимания платежей за пользование водным фондом, реализация механизма платного водопользования;

государственный контроль за соблюдением водного законодательства, использованием и охраной водного фонда, хозяйственной деятельностью в пределах водоохраных зон водных объектов;

ограничение, приостановление или запрещение сброса сточных вод вплоть до прекращения деятельности отдельных промышленных установок, цехов, предприятий, организаций, учреждений до устранения нарушения и ликвидации последствий загрязнения;

распоряжение природными и искусственными материалами, извлекаемыми из водных объектов при проведении работ, связанных с их эксплуатацией и восстановлением;

подготовка материалов и участие в разработке международных договоров и соглашений по использованию и охране трансграничных природных систем.

Предписания и решения государственного органа управления водным фондом, принимаемые в пределах его компетенции, обязательны для юридических и физических лиц.

Государственные органы управления наделены не только предписывающими, но и контролирующими функциями.

Государственный контроль за использованием и охраной водного фонда должен обеспечить соблюдение всеми водопользователями порядка пользования водами, законодательства, стандартов (правил, норм) в области использования и охраны объектов водного фонда, а также правил ведения государственного учета вод и отчетности.

Государственный контроль за использованием и охраной водного фонда осуществляют органы государственной власти и управления субъектов Федерации и государственные органы управления водным фондом, которые наделены правами государственной инспекции по использованию и охране вод.

Вместе с тем контроль невозможен без постоянного наблюдения за количеством и качеством водных ресурсов. В целях оценки состояния государственного водного фонда на территории Российской Федерации организуют мониторинг вод, который проводят в рамках мониторинга окружающей природной среды. Структуру, содержание и порядок осуществления мониторинга вод устанавливает правительство Российской Федерации.

Данные оперативных измерений систематизируются в Государственном водном кадастре.

### **2.3. Государственный учет вод. Водный кадастр**

Основы водного законодательства Российской Федерации предполагают ведение государственного учета и контроля за использованием и охраной водных ресурсов по количественным и качественным показателям.

Основная задача государственного учета вод состоит в определении количества и качества водных ресурсов, составляющих единый государственный фонд данных об использовании вод для нужд народного хозяйства. Такой контроль предполагает соблюдение всеми заинтересованными отраслями народного хозяйства, отдельными предприятиями и учреждениями, а также гражданами установленного порядка использования и учета вод, ликвидацию последствий от их вредного воздействия.

В России существует единая система государственного учета и использования водных ресурсов. В систему включены различные предприятия-водопользователи, соответствующие местные и республиканские органы.

Основные принципы функционирования системы государственного учета использования водных ресурсов сводятся к следующему.

Отдельные водопользователи осуществляют первичный учет водопотребления и водоотведения. Результаты учета представляют в виде отчетов по установленной форме местным органам по регулированию использования и охране вод, которые располагают вычисли-

тельными центрами и контролируют правильность ведения отчетности. После необходимых обобщений данные поступают в головной вычислительный центр, где отчетность обобщают в целом по стране.

Такая организация учета и использования вод значительно упрощает обработку данных, улучшает анализ использования водных ресурсов и способствует более рациональному планированию водопотребления и водоотведения. Последнее обстоятельство важно еще и потому, что в водных объектах, в которые сбрасывают сточные воды, необходимо иметь объемы чистых вод, обеспечивающих в среднем десятикратное разбавление даже очищенных стоков.

Полученные материалы используют для составления сборников основных показателей использования вод в стране и водного кадастра.

*Государственный водный кадастр (ГВК)* Российской Федерации является государственным регистрационным документом водных объектов и водопользователей и содержит совокупность официальных сведений о состоянии и использовании водных объектов и их водных ресурсов, а также о водопользователях.

Порядок ведения ГВК, являющегося юридическим документом и служащим основанием для принятия соответствующих управленческих, судебных и иных решений, устанавливает правительство Российской Федерации. Сведения, содержащиеся в ГВК, могут быть опровергнуты только в судебном порядке.

ГВК – систематизированный, постоянно пополняемый и при необходимости уточняемый свод сведений о водных объектах, составляющих единый государственный водный фонд: водных ресурсах, режиме, качестве и использовании вод, а также о водопользователях.

Современный ГВК включает данные учета вод по количественным и качественным показателям, регистрации водопользователей, а также данные учета использования вод.

В соответствии с видами водных объектов и распределением обязанностей по изучению и использованию вод ГВК включает следующие разделы и подразделы:

1. Поверхностные воды: 1.1. Реки и каналы; 1.2. Озера и водохранилища; 1.3. Качество вод суши; 1.4. Селевые потоки; 1.5. Ледники; 1.6. Моря и морские устья рек.

2. Подземные воды.

3. Использование вод.

Ежедневные, многолетние наблюдаемые и фондовые данные ГВК издают по территориям, бассейнам рек, озерам, а по разделу подземных вод – по гидрогеологическим регионам.

Государственный водный кадастр вместе со справочниками по климату, составляемыми по программе, разработанной в Главной геофизической лаборатории имени А. И. Воейкова для отдельных районов страны, является важным исходным материалом при проектировании водохозяйственных объектов.

Для систематического обновления и пополнения ГВК существует специальная автоматизированная информационная система (АИС ГВК).

## 2.4. Водное законодательство России

Принятие водного законодательства обусловлено необходимостью правового, экономического и организационного регулирования деятельности водохозяйственных органов.

Обстановка, сложившаяся в водном хозяйстве, вызывает серьезную озабоченность. Продолжается прогрессирующее снижение водных ресурсов южных рек страны под влиянием хозяйственной деятельности от 10 % (р. Волга) до 25...40 % (реки Дон, Кубань, Терек, Сулак), уменьшается годовой сток крупных южных рек. Продолжается деградация малых рек России. По гидробиологическим показателям только 12 % водных объектов можно отнести к условно чистым (фоновым), 32 – загрязненным (стадия релаксации), 56 % – сильно загрязненным (их экосистема находится в стадии деградации).

Учитывая сложность подготовки этого очень емкого и крайне важного законопроекта было решено принять Основы водного законодательства Российской Федерации, а детальную правовую регламентацию осуществить в подзаконных актах.

Основы водного законодательства состоят из десяти разделов, каждый из которых отражает одну из наиболее важных сторон деятельности в сфере водного хозяйства.

**Раздел I. Общие положения.** Определяют основные принципы закона: сферу действия законодательства и его задачи; устанавливает государственную собственность на водные объекты и декларирует необходимость бассейнового принципа при изучении, использовании, создании, ликвидации, восстановлении и охране водных объектов.

В этом разделе оговорены компетенции различных субъектов Федерации по отношению к водным ресурсам.

Так, к совместному ведению Российской Федерацией и республиками в ее составе в области регулирования водных отношений подлежит: защита прав граждан по вопросам пользования водными объектами, сохранение природной среды в целях защиты водной флоры и фауны, определение и изменение правового статуса водных объектов, регулирование количества и качества водных ресурсов, выдача лицензий на право пользования водными объектами, установление принципов налогообложения и механизмов сборов за пользование водными объектами, устранение статуса зон чрезвычайных экологических ситуаций на водных объектах и охрана водных объектов. Разработка и реализация схем комплексного использования, восстановления и охраны водных объектов, ведение государственного учета вод, Государственного водного кадастра и мониторинга вод, введение ограничений на право пользования водными объектами и ряд других.

**Раздел II. Государственное управление использованием и охраной водного фонда.** В этом разделе установлены принципы и система государственного управления и контроля за использованием и охраной водного фонда. Управление и контроль (включая и экологический) реализуются путем ведения ГВК, мониторинга, разработки схем комплексного использования и охраны водных ресурсов и многовариантных ВХБ.

Высокому научно-техническому уровню разработок способствует государственная экспертиза использования и охраны водного фонда.

В целях избежания негативных экологических последствий в этом разделе оговорено о возможности участия общественности в охране и оздоровлении государственного водного фонда.

Общественные объединения и граждане в части охраны и оздоровления водного фонда имеют право:

принимать участие в обсуждении проектов и программ по восстановлению и охране водного фонда;

создавать общественные объединения по охране водного фонда;

принимать участие в собраниях, митингах и других общественных мероприятиях, связанных с охраной водного фонда;

выполнять работы по охране и восстановлению водного фонда за счет своих средств и добровольного участия населения.

Общественные объединения и граждане оказывают содействие государственным органам в осуществлении мероприятий по рациональному использованию и охране государственного водного фонда в порядке, устанавливаемом законодательством Российской Федерации.

**Раздел III. Пользование водными объектами.** В нем раскрываются цели водопользования и устанавливаются права и обязанности водопользователей. Определяются сроки и лимиты пользования водным объектом.

Рассматривается порядок выдачи разрешений (лицензий), которые должны содержать данные о целях водопользования, границах водного объекта, лимитах пользования, сроке действия лицензий, размере и условиях платы за пользование, охране экосистем, а также права и обязанности водопользователей, гарантию и защиту их прав с учетом антимонопольных требований.

**Раздел IV. Виды пользования водными объектами.** Этот раздел посвящен регламентированию водопользования различными участниками ВХК: коммунально-бытовым хозяйством, здравоохранением, сельским хозяйством, энергетикой, промышленностью, рыбным и охотничьим хозяйством, транспортом, рекреацией, экосистемой и др.

Для каждого участника оговорены права, ограничения и ответственность за нарушения соответствующих статей закона.

**Раздел V. Охрана водных объектов.** Здесь рассмотрены общие требования к юридическим и физическим лицам по использованию и охране водных объектов; экономические требования по размещению, строительству и вводу в эксплуатацию хозяйственных объектов;



требования по охране подземных вод и производству работ на водных объектах и в прибрежных водоохраных зонах.

Кроме того, сформулированы экологические требования к технике, технологии, сооружениям, материалам, веществам, оказывающим воздействие на водные объекты, а также требования к нормированию антропогенных воздействий.

В требованиях подчеркивается необходимость сохранения и восстановления природных экосистем, их видового разнообразия и генофонда исчезающих видов. Установлены подходы к определению экологических попусков и предельных норм безвозвратного изъятия поверхностного стока. Здесь же рассмотрены требования к использованию земель и лесов водоохраных и санитарных зон.

**Раздел VI. Правовой режим особо охраняемых водных объектов.** В этом разделе сформулировано определение водного объекта и рассмотрены процедуры формирования резервного фонда особо охраняемых водных объектов.

**Раздел VII. Экономическое регулирование рационального использования и охраны водных ресурсов.** Приведены цели, задачи и принципы экономического регулирования. Рассмотрены виды платежей, штрафные санкции за нарушение установленных лимитов, нормативов и условий пользования водными объектами, а также акцизные и лицензионные сборы, механизмы экономического стимулирования рационального использования, восстановления и охраны водных объектов. Средства, получаемые от водопользователей, формируют государственный фонд восстановления и охраны водных объектов.

**Раздел VIII. Разрешение споров в области использования и охраны водных объектов.** В разделе определены недействительность сделок, нарушающих право государственной собственности на водные объекты, административная и уголовная ответственность за нарушение водного законодательства, механизм возмещения убытков.

**Раздел IX. Ответственность за нарушение водного законодательства.** Определяет, что если договором установлены иные правила, чем те, которые содержатся в Основах водного законодательства, то применяются правила международного договора.

### *Контрольные вопросы и задания*

1. Каков критерий необходимости перехода от поотраслевого (т. е. некомплексного) к комплексному подходу в распределении водных ресурсов?
2. Расскажите о прогнозе водопотребления. Что нужно знать для его составления?
3. Возможен ли поотраслевой подход к распределению водных ресурсов в условиях их дефицита?
4. Какие территориальные единицы планирования КИОВР вы знаете?

## Глава 2

### ВОДОХОЗЯЙСТВЕННЫЕ БАЛАНСЫ (ВХБ)

#### 3. НАЗНАЧЕНИЕ И ВИДЫ ВХБ

*Водохозяйственный баланс* в отличие от водного баланса, который служит для анализа природных и антропогенных изменений в круговороте воды, является научной основой планирования использования вод, оперативного управления водными ресурсами, определения направленности водохозяйственных мероприятий по удовлетворению участников ВХБ в необходимых объемах воды заданного качества.

ВХБ оценивают наличие и степень использования воды по речным бассейнам, экономическим районам, республикам и стране.

ВХБ различают (Водное хозяйство. Т. 5, 1988):

*перспективные* (проектные), составляемые в схемах КИОВР, технико-экономических обоснованиях (ТЭО) и проектах на 15...20 лет вперед. Предназначены они для выявления мероприятий по сокращению потребления или увеличению объема водных ресурсов;

*плановые* составляют для проверки сбалансированности потребностей в воде, предусматриваемых в проектах, с наличием водных ресурсов;

*отчетные*, которые применяют для анализа использования водных ресурсов. Они являются частью Государственного водного кадастра;

*оперативные*, составляемые для уточнения режимов эксплуатации водохранилищ и ВХС и оперативного планирования водораспределения.

#### 4. УРАВНЕНИЕ ВХБ

*Водохозяйственный баланс* – это результат сопоставления имеющихся в бассейне или на данной территории водных ресурсов с их использованием на различных уровнях развития народного хозяйства. Как видно из определения, ВХБ ( $\Delta W$ ) состоит из двух основных частей – приходной и расходной.

*Приходная часть* ( $W_{\text{прих}}$ ) – это наличные водные ресурсы рассматриваемой территории, *расходная* ( $W_{\text{расх}}$ ) – потребности в воде различных отраслей народного хозяйства, коммунальные, экологические нужды, относящиеся к этой территории, а также попуски воды ниже по течению.

Уравнение ВХБ имеет вид

$$\Delta W = W_{\text{прих}} - W_{\text{расх}} \quad (7)$$

ВХБ обычно составляют для лет различной обеспеченности – среднего года  $P = 50$  %-й, среднемаловодного  $P = 75$  и маловодного  $P = 95$  %-й.

Приходную часть ВХБ определяют по данным гидрометеорологических наблюдений, обобщенным материалам по стоку и др. При этом необходимо учитывать антропогенные изменения стока и асинхронность его для различных водотоков.

Расходную часть ВХБ устанавливают на основании оценки водопотребления промышленности, теплоэнергетики, орошения и обводнения сельскохозяйственных земель, городского и сельского водоснабжения. Кроме того, в ВХБ следует учитывать объемы водных ресурсов, необходимые для функционирования природных комплексов (экосистем).

По результатам расчетов ВХБ оценивают водообеспечение для развития народного хозяйства, устанавливают распределение водных ресурсов между участниками ВХК и определяют методы регулирования, позволяющие устранить дефициты воды.

ВХБ (млн м<sup>3</sup>) участка реки (рис. 7) за расчетный период (год, сезон, месяц) можно записать в виде

$$V_{i-1} + V_i \pm \Delta V_i \pm \Delta V + V_{\text{п}}^+ + V^+ + V_{\text{в}} = V + E + V_{\text{р}} + V_{\text{п}}^- + V_{\text{ф}} + V^- + V_{i+1}, \quad (8)$$

где  $V_{i-1}$  — поступление воды на  $i$ -й участок по речной сети;  $V_i$  — поступление воды с водосбора  $i$ -го участка;  $\pm \Delta V_i$  — изменение стока с  $i$ -го участка под влиянием хозяйственной деятельности;  $\pm \Delta V$  — накопление (—) или сработка (+) запасов воды в водохранилище и русле реки;  $V_{\text{п}}^+$  — объемы подземных вод (потенциально возможные для использования), гидравлически не связанные с речными;  $V^+$  — поступление воды из других бассейнов;  $V_{\text{в}}$  — поступление на  $i$ -й участок возвратных (сточных, дренажных и шахтных) вод;  $V$  — забор воды из всех источников для использования в пределах  $i$ -го участка;  $E$  — потери воды на испарение, состоящие из потерь на испарение до создания водохранилища  $e$  и дополнительных потерь  $\Delta e$  после его создания,  $E = e + \Delta e$ ;  $V_{\text{р}}$  — объемы воды, необходимые на разбавление сточных вод для доведения концентраций загрязняющих веществ до предельно

допустимых (ПДК);  $V_{\text{п}}^-$  — использование подземных вод, гидравлически не связанных с речными;  $V_{\text{ф}}$  — потери воды на фильтрацию, не используемые на  $i$ -м участке;  $V^-$  — подача воды за пределы  $i$ -го участка;  $V_{i+1}$  — попуски по руслу за пределы  $i$ -го участка, состоящие из транзитных объемов (санитарные попуски и др.)  $T$  и дефицита или избытка ресурса  $\delta V$ , который необходимо добавить или возможно использовать на  $i$ -м участке или  $i+1$ -м участке,  $V_{i+1} = T + \delta V$ .

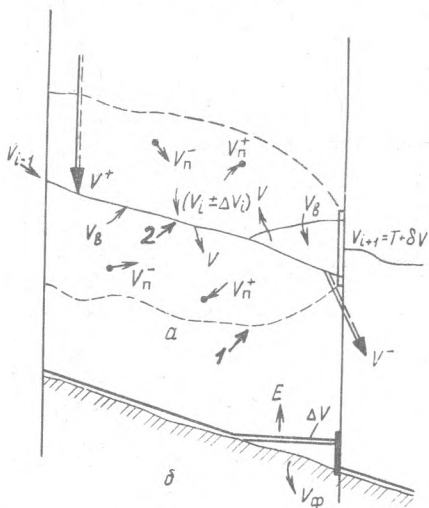


Рис. 7. Схема распределения составляющих водохозяйственного баланса:

1 — граница водосбора; 2 — подача воды из других районов по каналам и трубопроводам; а — план водосбора; б — разрез по оси водотока

При  $\delta V > 0$  ВХБ благоприятный, дополнительные водохозяйственные мероприятия не требуются, а при  $\delta V < 0$  необходимо найти методы управления ВХС, позволяющие получить  $\delta V = 0$ .

Обеспеченность составляющих ВХБ принимают в зависимости от необходимой надежности снабжения водой (число бесперебойных лет в процентах):

| Участники ВХС  | Обеспеченность, % |
|--|-------------------|
| Водоснабжение населения, животноводства и промышленности | 99                |
| Орошаемое земледелие                                     | 50...95           |
| Гидроэнергетика  | 75...95           |
| Рыбное хозяйство   | 75...95           |
| Водный транспорт   | 75...95           |
| Природные комплексы (озера, моря, поймы, дельты и др.)   | Не менее 50       |

Результаты расчета ВХБ сводят в таблицу 3.

### 3. Расчет ВХБ

| (Наименование территории, участка реки)<br>(вид баланса, расчетный уровень)<br>(расчетная обеспеченность) |                     |                    |
|---|---------------------|--------------------|
| Элементы ВХБ  | Расчетные интервалы | Млн м <sup>3</sup> |
| <b>Баланс по речным водам</b>   |                     |                    |
| <i>Приходная часть</i>  |                     |                    |
| Сток, поступающий на данный участок   |                     |                    |
| Сток, формирующийся на данном участке   |                     |                    |
| Изменение стока под влиянием антропогенной деятельности   |                     |                    |
| Сработка водохранилища  |                     |                    |
| Изменение запасов воды в речной сети  |                     |                    |
| Подача воды на участок извне  |                     |                    |
| Привлекаемый подземный сток, гидравлически не связанный с рекой   |                     |                    |
| Поступление возвратных вод (сточных, дренажных и шахтных)   |                     |                    |
| Итого — располагаемые водные ресурсы  |                     |                    |
| <i>Расходная часть</i>  |                     |                    |
| Наполнение водохранилищ   |                     |                    |
| Потери воды из водохранилищ   |                     |                    |
| Суммарный отбор речных вод  |                     |                    |
| Суммарный отбор подземных вод   |                     |                    |

| (Наименование территории, участка реки)<br>(вид баланса, расчетный уровень)<br>(расчетная обеспеченность) |                        |                    |
|---|------------------------|--------------------|
| Элементы ВХБ  | Расчетные<br>интервалы | Млн м <sup>3</sup> |
| Передача стока за пределы расчетных створов   |                        |                    |
| Объем воды, необходимый для разбавления возвратных вод  |                        |                    |
| Попуск в замыкающем створе  |                        |                    |
| Итого — расходная часть баланса   |                        |                    |
| <i>Избыток или дефицит речных вод</i>   |                        |                    |
| Равен разности располагаемых водных ресурсов и потребности в воде   |                        |                    |
| <i>Возможный сток<br/>на следующий по течению участок реки</i>  |                        |                    |
| <b>Баланс по подземным водам</b>  |                        |                    |
| Эксплуатационные запасы подземных вод   |                        |                    |
| Искусственное восполнение запасов подземных вод   |                        |                    |
| Суммарный отбор   |                        |                    |
| Итого — избыток или дефицит подземных вод   |                        |                    |

#### 4.1. Приходная часть ВХБ

Практический интерес представляют в основном возобновляемые водные ресурсы, которые при их рациональном использовании практически неистощимы, поскольку ежегодно восстанавливаются в процессе круговорота воды на Земле, т. е. водообмена между сушей и океаном.

Поэтому главным источником воды для коммунально-бытовых и хозяйственных нужд является речной сток  $R$  (млн м<sup>3</sup>), который разделяют на поверхностный  $S$  и подземный  $U$

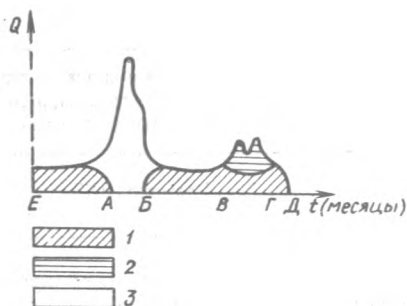
$$R = S + U. \quad (9)$$

Питание рек поверхностными водами происходит в период обильных дождей или таяния снега, а питание подземными водами поддерживает течение в реках в другие периоды.

Влияние грунтовых вод в питании рек видно на гидрографе, представленном на рисунке 8. В период межени (в летний период  $B - B$  и в зимний период  $\Gamma - Д$  и  $E - A$ ) реки питаются за счет подземных вод. В осенний период ( $B - \Gamma$ ) во время дождей питание грунтовыми водами вследствие повышения уровня воды в реке несколько ослабевает.

Рис. 8. Типы питания реки:

1 — грунтовое; 2 — дождевое; 3 — половодье



В период половодья (А — Б) питание грунтовыми водами снижается еще больше.

Состав среднегодового стока по видам питания рек приведен в таблице 4.

#### 4. Питание крупнейших рек бывшего СССР

| Река    | Типы питания, пополняющие сток рек, % |          |            |           |
|---------|---------------------------------------|----------|------------|-----------|
|         | снеговое                              | дождевое | ледниковое | грунтовое |
| Кубань  | 12                                    | 24       | 32         | 32        |
| Терек   | 11                                    | 21       | 37         | 31        |
| Днепр   | 52                                    | 18       | —          | 30        |
| Волга   | 53                                    | 17       | —          | 30        |
| Даугава | 50                                    | 22       | —          | 28        |
| Лена    | 40                                    | 35       | —          | 25        |
| Дон     | 60                                    | 17       | —          | 23        |
| Енисей  | 46                                    | 36       | —          | 18        |
| Амур    | 64                                    | 19       | —          | 17        |

Большинство крупных рек бывшего СССР имеет грунтовое питание. Это связано с тем, что меженный период этих рек продолжается большую часть года. У равнинных рек наиболее значителен объем половодья, несмотря на его кратковременность. Такие равнинные реки можно назвать реками с преобладающим снеговым и грунтовым питанием. Сток половодья можно использовать полнее, если проводить его естественное или искусственное регулирование. Без регулирования стока большее значение имеет подземное питание рек грунтовыми водами, которое наиболее устойчиво и постоянно.

Обеспеченность устойчивым подземным стоком приведена в таблице 5.

Обеспеченность устойчивым подземным стоком на Европейской территории бывшего СССР в 2,5 раза меньше, чем для всей суши в целом. Это создает определенные трудности, так как поверхностный

### 5. Обеспеченность устойчивым подземным стоком различных регионов

| Регион                         | Сток, тыс. м <sup>3</sup> на человека в год |           | Отношение подземного стока к полному, % |
|--------------------------------|---|-----------|---|
|                                | полный                                      | подземный |   |
| Вся суша                       | 11,2  | 4         | 36                                      |
| Европа                         | 5,1   | 1,9       | 37                                      |
| Азия                           | 6,2   | 1,6       | 26                                      |
| Северная Америка               | 19,2  | 5,5       | 32                                      |
| Южная Америка                  | 54,3  | 17,6      | 32                                      |
| Африка                         | 12,3  | 4,3       | 35                                      |
| Бывший СССР                    | 17,5  | 4,1       | 23                                      |
| Европейская часть бывшего СССР | 6,2   | 1,8       | 28                                      |
| США                            | 11,4  | 3,2       | 28                                      |
| Бразилия                       | 59,5  | 19,7      | 33                                      |
| Кипр                           | 0,06  | 0,02      | 33                                      |

сток, образующий в реках паводки, неустойчив, его можно зарегулировать, для того чтобы постоянно использовать, и поэтому этот сток в значительной степени можно рассматривать как потенциальные водные ресурсы.

Подземные воды, гидравлически не связанные с речным стоком (не дренируемые рекой), также используют в водном хозяйстве. Этот объем подземных вод, участвующих в кругообороте, намного меньше объема воды, дренируемого реками из подземных горизонтов.

Поэтому при составлении ВХБ подземные воды, гидравлически связанные с реками, учитывают в речном стоке, а гидравлически не связанные с рекой, учитывают самостоятельно (см. табл. 4).

Особенность водных ресурсов — их *стохастический характер*. Годовой объем речного стока не остается постоянным, а изменяется от года к году и в течение года (табл. 6).

### 6. Распределение стока внутри года

| Река  | Средний годовой сток, км <sup>3</sup> | Распределение стока внутри года, % |             |                 | Отношение высокого расхода к низкому |
|-------|---------------------------------------|------------------------------------|-------------|-----------------|--------------------------------------|
|       |                                       | март—июнь                          | июль—ноябрь | декабрь—февраль |                                      |
| Лена  | 531,6                                 | 65                                 | 29          | 6               | 196                                  |
| Обь   | 386                                   | 50                                 | 44          | 6               | 19                                   |
| Амур  | 342                                   | 40                                 | 53          | 7               | 107                                  |
| Волга | 214                                   | 63                                 | 28          | 9               | 55                                   |
| Днепр | 35,9                                  | 65                                 | 24          | 11              | 117                                  |
| Дон   | 19,4                                  | 75                                 | 18          | 7               | 170                                  |
| Урал  | 6,4                                   | 81                                 | 15          | 4               | 930                                  |

Максимальный сток рек по тысячи раз может быть больше минимального. На многих реках России большая часть стока приходится на весенние месяцы, а в зимнее время, когда реки переходят полностью на грунтовое питание, водность их резко падает и некоторые реки полностью промерзают.

Для речного стока характерны значительные колебания по годам. В многоводные годы сток большинства рек может в 2...3 раза превышать объем стока маловодных лет, а для малых рек в засушливых районах это превышение может увеличиться до нескольких десятков раз. Для многолетнего стока характерно чередование ряда многоводных лет рядом маловодных, формирование таких группировок обусловлено процессами влагооборота между разными частями гидросферы. Таким образом, возможность использования водных ресурсов зависит от закономерностей чередования маловодных и многоводных лет.

Зависимость использования воды от колебаний стока можно уменьшить, если зарегулировать его. Различают естественное и искусственное регулирование стока.

При естественном регулировании часть поверхностного стока переходит в подземный, увеличивая устойчивую часть речного стока. Естественными регуляторами стока являются озера, леса и болота, поэтому очень важно обеспечить их сохранность. Зарегулировать сток можно также, создав искусственные сооружения – водохранилища (как наземные, так и подземные), которые позволят перераспределить сток во времени. Поэтому при расчете приходной части ВХБ в качестве одной из составляющих принят объем сработки водохранилища, т. е. объем, который был накоплен в предыдущий многоводный период и который может быть в случае, если это целесообразно, использован в рассматриваемом периоде (интервале времени, для которого рассчитывают ВХБ).

Еще одна особенность водных ресурсов – их динамизм. Это позволяет использовать не только водные ресурсы, формирующиеся на рассматриваемой территории, но и сток, поступивший вследствие высокого динамизма водных ресурсов со смежной территории, расположенной выше по течению. Поэтому в уравнении приходной части ВХБ есть соответствующий член. Кроме того, можно учитывать и водные ресурсы, поступившие на рассматриваемую территорию с соседних бассейнов по искусственным водоводам (каналам, туннелям и т. п.).

Следующая особенность водных ресурсов – возможность их многократного использования. Забранная из рек вода после ее хозяйственного использования вновь возвращается в реки, конечно, в меньшем количестве и другого качества. Количество безвозвратно использованной воды зависит от вида хозяйственного использования. Особенно велики безвозвратные потери воды в орошаемом земледелии, являющемся основным водопотребителем. Ухудшение качества воды требует разбавления сточных вод свежей водой.



Перечисленные особенности водных ресурсов обуславливают структуру приходной части ВХБ.

*Приходная часть ВХБ состоит из объемов речного стока, эксплуатационных запасов подземных вод и возвратных вод ( $q$ ). При этом необходимо напомнить, что при рассмотрении ВХБ какой-либо территории нужно различать сток, поступающий со смежной территории (выше по течению),  $V_{i-1}$  и сток, формирующийся в пределах рассматриваемой территории,  $V_i$ . Кроме того, к водным ресурсам, которые можно использовать, относятся также объемы сработки водохранилища. Использовать можно также сток, поступающий из других бассейнов  $V^+$  (например, по каналу, трубопроводу, тоннелю).*

*Возвратные воды* – это технологические отходы различных промышленных предприятий, дренажные воды осушительных и оросительных систем, шахтные воды, сточные воды коммунально-бытового хозяйства и т. п. Доля возвратных вод от потребления характеризуется коэффициентом возврата. Наибольший коэффициент возврата имеют промышленные предприятия при прямоточном водоснабжении –  $K_B = 0,9$ , в коммунально-бытовом хозяйстве  $K_B = 0,8$ , в орошаемом земледелии  $K_B = 0,15$ . Приходная часть ВХБ в соответствии с уравнением (8) имеет вид

$$V_{i-1} + V_i + V^+ + V_{\text{п}}^+ + \sum_{j=1}^n q_j + \Delta V \pm \Delta V_i = V_{\text{прих}} \quad (10)$$

где  $V_{i-1}$  – приток речных вод со смежной территории;  $V_i$  – естественный сток, формирующийся на рассматриваемой территории;  $V^+$  – сток, поступающий из других бассейнов;  $V_{\text{п}}^+$  – эксплуатационные запасы подземных вод, гидравлически не связанные с речным стоком;  $q_j$  – объем возвратных вод  $j$ -го водопотребителя;  $n$  – число водопотребителей, сточные воды которых возвращаются на рассматриваемую территорию;  $\Delta V$  – объем сработки водохранилища, расположенного на этой территории, за рассматриваемый период;  $\Delta V_i$  – изменение стока с  $i$ -го участка под влиянием антропогенной деятельности (размерность всех составляющих – млн м<sup>3</sup>).

Схема формирования приходной части ВХБ приведена на рисунке 7.

## 4.2. Расходная часть ВХБ

Уравнение расходной части ВХБ (млн м<sup>3</sup>) имеет такой вид:

$$V_{\text{расх}} = \sum V_j + \sum V_{\text{пол}l} + \sum V_k + V_{\text{пот}} + V_{\text{нап}} + V_{\text{пз}} \quad (11)$$

где  $V_j$  – объем водопотребления  $j$ -м водопотребителем;  $V_{\text{пол}l}$  – объем полусков  $l$ -го вида;  $V_k$  – объем, необходимый для разбавления возвратных вод  $k$ -го вида;  $V_{\text{пот}}$  – объем потерь;  $V_{\text{нап}}$  – объем, необходимый для наполнения водохранилища;  $V_{\text{пз}}$  – уменьшение стока за счет отбора подземных вод, гидравлически связанных с ним.

Проанализируем составляющие расходной части.

*Объемы водопотребления* зависят от объема продукции и норм водопотребления:

$$V_j = B_j q_j / \eta_j, \quad (12)$$

где  $B_j$  — объем продукции  $j$ -го водопотребителя за рассматриваемый период;  $q_j$  — норма  $j$ -го водопотребителя;  $\eta_j$  — КПД водоподводящих устройств.

При расчете перспективных ВХБ объемы продукции определяют на основе гипотезы развития народного хозяйства (см. разд. 1), а плановых ВХБ — на основе планов развития отрасли.

В перспективе, с изменением технологии и при совершенствовании системы водоснабжения, норма водопотребления и величина КПД могут изменяться. Поэтому прогнозировать водопотребление достаточно сложно (см. разд. 1).

Попуски в нижний бьеф осуществляют в энергетических, навигационных, рыбохозяйственных, водоснабженческих и природоохраных целях.

Энергетические пуски проводят для получения электрической энергии при покрытии пика графика нагрузки энергосистемы. Все остальные виды пусков могут также проходить через турбины гидроэлектростанции, однако, поскольку они имеют подчиненный характер, используют их для выработки базисной электроэнергии.

Навигационные пуски необходимы для поддержания гарантированных глубин в навигационный период. Иногда проводят единовременные пуски для создания повышенных глубин на каком-либо участке нижнего бьефа для обеспечения прохождения каравана крупнотоннажных судов.

Чаще всего требуются транспортно-энергетические пуски или энерготранспортные (в зависимости от того, какой участник является ведущим).

Рыбохозяйственные и сельскохозяйственные пуски нужны в тех случаях, когда в результате строительства водохранилищ произошли изменения гидрологических условий в нижнем бьефе, а также для того, чтобы скомпенсировать отсутствие половодий, отрицательно сказывающихся на состоянии рыбного и сельского хозяйства из-за потерь нерестилищ и заливных лугов. В этом случае пуски осуществляют в период нереста рыбы или в начале вегетации луговой растительности.

К сельскохозяйственным можно также отнести пуски, которые проводят в вегетационный период для обеспечения водозаборов из нижнего бьефа для оросительных систем.

Водоснабженческие пуски осуществляют для удовлетворения нужд питьевого и промышленного водоснабжения, и они должны поддерживать необходимые уровни в нижних бьефах, гарантирующих бесперебойную работу водозаборных сооружений.

Санитарные пуски предназначены для поддержания надлежащего санитарного состояния реки в нижнем бьефе. В правилах использования водных ресурсов водохранилищ для каждой реки определены размеры обязательных санитарных пусков в створах,

наиболее важных с точки зрения санитарного состояния реки. Необходимы также попуски для разбавления сточных вод, поступающих в нижний бьеф, если объем санитарных попусков недостаточен для требуемого разбавления.

Природоохранные попуски проводят для поддержания нормального функционирования экосистем в нижнем бьефе. Они могут предназначаться для пойменных лесов, дельтовых экосистем, а также для поддержания экосистемы озер и морей, принимающих зарегулированные реки.

Попуски, осуществляемые в нижний бьеф, характеризуются графиками попусков (объемом воды, сброшенной за определенный период). Для каждого вида попусков необходимо знать их режим, характеризуемый графиком, для того чтобы определить объем попусков за период, для которого рассчитывают ВХБ.

Графики отраслевых попусков в нижний бьеф Волгоградского гидроузла приведены на рисунке 9.

Промышленные и коммунальные стоки даже после очистки содержат органические и минеральные загрязняющие вещества. Для интенсификации самоочищающей способности водотока или водоема возвратные воды разбавляют свежей водой, объем которой во много раз превышает технологическую потребность в воде. Например, сточные воды химической и нефтеперерабатывающей промышленности требуют очень большого (до 2000 раз) разбавления, целлюлозно-бумажной промышленности – до 50 раз и т. д.

Объемы вычисляют по зависимостям:

$$V_{\text{в.и}} = K_{\text{в.и}} V_i; \quad (13)$$

$$V_{\text{разб.и}} = K_{\text{разб.и}} V_{\text{в.и}}, \quad (14)$$

где  $V_{\text{в.и}}$  – объем возвратных вод  $i$ -го водопотребителя;  $K_{\text{в.и}}$  – коэффициент возврата  $i$ -го водопотребителя;  $V_{\text{разб.и}}$  – объем воды, необходимый для разбавления возвратных вод  $i$ -го водопотребителя;  $K_{\text{разб.и}}$  – коэффициент разбавления  $i$ -го водопотребителя.

При расчете расходной части ВХБ учитывают потери на испарение и фильтрацию. Поверхность водохранилищ испаряет больше воды, чем поверхность суши, которая была затоплена. Поэтому потери можно учитывать как особый вид водопотребления.

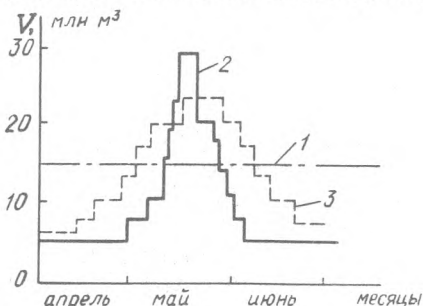


Рис. 9. Графики отраслевых попусков в нижний бьеф Волгоградского гидроузла:

1 – энергетические попуски; 2 – сельскохозяйственные; 3 – рыбохозяйственные

При подсчете расходной части ВХБ необходимо учитывать объем подземных вод, используемых для нужд коммунально-бытового хозяйства, если они связаны гидравлически с речным стоком и если не связаны, так как в приходной части ВХБ учитывают их общее количество (гидравлически связанные подземные воды – в объеме речного стока, гидравлически не связанные – отдельной составляющей приходной части ВХБ).

Если ВХБ рассчитывают для многолетнего периода, то часть воды необходимо запасти для использования в маловодный период. Для этого в расходную часть ВХБ вводят член, характеризующий объем накопления воды в водохранилище.

### 4.3. Перспективный ВХБ

Как было показано выше, перспективные балансы составляют для различных по водности лет с обеспеченностью, %: средневодного – 50, маловодного – 75 и очень маловодного – 95.

В зависимости от времени прогноза ВХБ (на данное время, на обозримую перспективу, на отдаленную перспективу) в балансах учитывают и изменение водных ресурсов, и изменение потребления.

Структура ВХБ позволяет выделить несколько направлений его изменения в целях ликвидации дефицита:

первое – более экономичное расходование воды в промышленности и сельском хозяйстве. При этом в орошении возможно существенное уменьшение поданной воды при сохранении довольно высокой продуктивности;

второе – временное перераспределение стока путем создания водохранилищ;

третье – пространственное перераспределение стока путем подвода воды из других бассейнов.

### 5. ПРИЧИНЫ ДЕФИЦИТА ВОДНЫХ РЕСУРСОВ В ОТДЕЛЬНЫХ РЕГИОНАХ

Если сравнить среднегодовую величину речного стока в целом по стране и среднегодовой объем водопотребления, то можно увидеть, что даже с учетом объемов воды, необходимых для разбавления сточных вод, ВХБ положителен. Однако по различным регионам отмечены дефицитные по воде области, что связано с неравномерным распределением воды по территории страны.

Большое значение имеет также неравномерность распределения среднегодового стока в течение года. Недефицитные в среднегодовом разрезе районы при расчете ВХБ по отдельным периодам года становятся дефицитными. Некоторые регионы имеют дефицит воды в маловодные годы.

Каковы же причины дефицита воды в некоторых регионах? Прежде всего это нерациональное водопотребление, отсталая водоемкая

технология производства отдельных видов продуктов, непрогрессивные системы водоснабжения, несоблюдение технологической дисциплины и т. п. Нормы потребления воды зачастую научно не обоснованы, завышены. Большие потери воды наблюдаются при транспортировании ее к месту потребления и при ее использовании. Много воды расходуется для рассоления земель, разбавления сточных вод, гидротранспорта, охлаждения, смыва навоза и других мероприятий, где использование не диктуется ее незаменимыми функциями, обуславливающими жизнедеятельность организмов, необходимостью ее присутствия в составе продукции. Немаловажное значение имеет и непродуманность в размещении водоемких производств там, где это не обусловлено климатом, традициями.

Что касается приходной части ВХБ, то происходит истощение ресурсов за счет антропогенного влияния на речной сток. Это выражается во всевозрастающем преобладании поверхностного неустойчивого стока над подземным из-за сведения лесов на водосборах, распашки прибрежных склонов, в результате чего уменьшается вододерживающая способность почв. На некоторых реках сток уменьшился на 20 % и более от среднегодового.

Отрицательно влияет на соотношение подземной и поверхностной составляющих речного стока рост городов и промышленных инфраструктур, так как в результате застройки, асфальтирования улиц, строительства дорог, устройства отвалов, свалок мусора вододерживающая способность почвы резко падает, появляются так называемые ливневые стоки, содержащие большое количество загрязнений.

Истощению водных ресурсов способствует заиление рек вследствие все усиливающейся эрозии почв. Применение мощной техники и повышенных доз минеральных удобрений позволило вовлечь в сельскохозяйственное использование низкоплодородные и малопригодные для сельского хозяйства участки. Зачастую это земли, расположенные на склонах и в поймах рек, на дне балок. Вовлечение их в сельскохозяйственное производство способствовало развитию водной эрозии вследствие увеличения склонового стока, приводящего к смыву почвы.

При строительстве водохранилищ возрастают потери воды, так как увеличивается площадь испарения. Вода, поступившая в атмосферу в парообразном состоянии, переносится на большие расстояния и выпадает в виде осадков далеко от района, где она испарилась. Поэтому хотя в глобальном масштабе вода, испаряемая с поверхности водохранилищ, попадая в кругооборот, может быть снова использована, ее считают потерянной для территории, с которой она испарилась. Потери ее столь велики, что их выделяют в одну из расходных статей баланса, и она вполне сопоставима с другими по количеству расходуемой воды.

К потерям воды ведет также фильтрация ее из чаши водохранилища, которая особенно значительна в начальный период заполнения

водохранилища, так как в это время происходит насыщение водой горных пород, слагающих дно и берега.

Существенное значение имеет качественное истощение водных ресурсов. Для того чтобы в процессе самоочищения сточные воды, предварительно очищенные до сброса их в водоемы, стали пригодными для вторичного использования, их многократно разбавляют чистой водой (кратность разбавления зависит от качественного состава сточных вод). Поэтому дефицит пресной воды усугубляется не только ростом водопотребления, количественным истощением природных вод, но и деградацией их качества. Сильно загрязняют водоемы ливневые стоки, промышленные и коммунально-бытовые сточные воды. Недостаточное разбавление сточных вод может привести к необратимым явлениям, в результате которых речную воду нельзя будет использовать для многих целей без предварительной глубокой и дорогостоящей водоподготовки. Одной из наиболее серьезных причин содержания солей в водоемах является сброс минерализованных коллекторно-дренажных вод с орошаемых земель, особенно с рисовых чеков, в которые вносят большое количество минеральных удобрений и гербицидов. Поэтому качественное истощение водных ресурсов является также одной из причин дефицита воды.

## 6. ПУТИ ПРЕОДОЛЕНИЯ ДЕФИЦИТА ВОДНЫХ РЕСУРСОВ

В соответствии с графом целей и задач обеспечения водными ресурсами страны по Н. Н. Моисееву (см. рис. 5), рассмотрим следующие основные методы, которыми можно регулировать водные ресурсы:

совершенствование технологии водопотребления и водораспределения (более точное регулирование водного режима орошаемых земель, введение государственного учета водопотребления и водоотведения, экономия непроизводительных затрат воды всеми участниками ВХК, борьба с испарением и фильтрацией);

использование очищенных сточных вод и внедрение оборотных систем и безводных технологий;

регулирование стока водохранилищами;

использование и восполнение подземных вод;

территориальное перераспределение стока;

опреснение коллекторных, грунтовых, шахтных и морских вод;

стимулирование осадков;

инженерное преобразование водосборов в целях регулирования стока, например создание лиманов и водохранилищ на местном стоке.

### 6.1. Внедрение прогрессивных технологий

Один из способов сокращения объемов потребляемой воды – снижение водоемкости производства, т. е. уменьшение расходования воды на единицу продукции.

Существующие технологии разрабатывали, когда вопросы водоснабжения не были столь острыми. Сейчас многие технологии не отвечают потребностям времени, которое требует снижения водопотребления вплоть до перехода там, где это возможно без ущерба окружающей среде, к безводным технологиям.

Так, в сельском хозяйстве необходимо более широко применять (там, где это возможно) мелкодисперсное, подпочвенное, капельное орошения, при которых расходование воды на единицу продукции меньше, чем при самотечном орошении или поливе дождеванием.

Высокий расход воды на единицу продукции в орошаемом земледелии приводит к необходимости более широкого внедрения комплексных мелиораций, или по крайней мере строительства мелиоративных систем двойного действия, предусматривающих осушение в период избытка влаги и орошение в периоды ее недостатка. Перспективно для увеличения выхода продукции на единицу используемой воды применение наряду с обычным дождеванием мелкодисперсного (аэрозольного увлажнения), которое позволяет эффективно регулировать микроклимат (температуру и влажность воздуха) посева. Мелкодисперсное дождевание можно применять и самостоятельно.

Более широко начинают внедрять маловодные технологии в промышленности. Так, при переработке нефти раньше расход воды составлял 10...15 м<sup>3</sup>/т, а теперь эта отрасль промышленности постепенно становится маловодным производством, потребление воды уменьшилось более чем в 100 раз. Аналогичные изменения характерны и для некоторых других производств.

Наряду со снижением водопотребления переход на маловодные технологии позволяет уменьшить вредное воздействие на природу и снизить себестоимость продукции.

В животноводстве также возможен переход на безводную технологию при уходе за животноводческими помещениями (применение вместо гидросмыва механической очистки от навоза).

Перспективно более широкое использование нетрадиционных источников электрической энергии: ветровой, солнечной. Это позволит уменьшить потребление воды на тепловых электростанциях и улучшить экологическую обстановку.

## **6.2. Применение прогрессивных систем водоснабжения**

Из существующих систем водоснабжения наиболее простая – *прямоточная схема* (рис. 10). Вода из источника водоснабжения подается к водопотребителю и после прохождения его и соответствующей очистки сбрасывают.

В *системах оборотного водоснабжения* (см. рис. 10), отработанную воду пропускают через охлаждающие или очистные устройства и затем снова направляют в производственный цикл. Предусматривают периодическое пополнение системы свежей водой (подпитку) для компенсации потерь.

При использовании воды для охлаждения системы оборотного водоснабжения подразделяют на открытые, где вода охлаждается в результате контакта ее с воздухом в градирнях, брызгальных бассейнах или прудах-охладителях, и закрытые, в которых оборотная вода не имеет контакта с атмосферным воздухом и охлаждается в теплообменных аппаратах, испарителях холодильных станций и т. д.

При *повторной* схеме водоснабжения (см. рис. 10) вода, уже использованная в определенных процессах, передается для использования на другие процессы этого же предприятия или на другие предприятия и после соответствующей очистки сбрасывается.

Возможна *комбинированная* схема, состоящая из оборотной и повторной. Такая система водоснабжения (см. рис. 10) наиболее перспективна.

Эффективность системы водоснабжения характеризуется следующими показателями:

коэффициентом оборотного водоснабжения

$$K_{об} = V_{об} / V_{п}, \quad (15)$$

где  $V_{об}$  — объем воды, используемый в системах оборотного водоснабжения;  $V_{п}$  — объем полного водопотребления:

$$V_{п} = V_{св} + V_{об}, \quad (16)$$

где  $V_{св}$  — объем свежей воды,

$$V_{св} = V_{бв} + V_{сб}, \quad (17)$$

здесь  $V_{бв}$  — объем безвозвратного водопотребления (в составе продукции, в потерях);  $V_{сб}$  — объем водоотведения (иначе объем сбросных, сточных или возвратных вод);

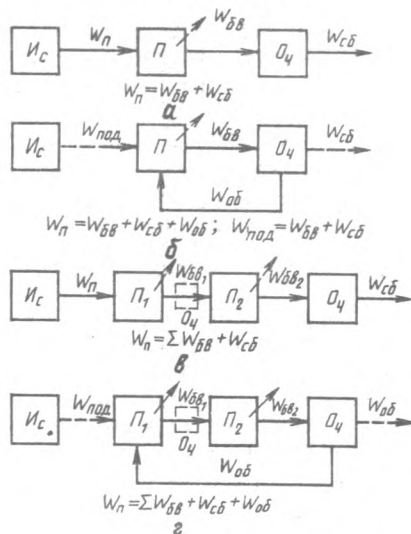
кратностью использования воды

$$n = V_{п} / V_{св}. \quad (18)$$

Чем выше коэффициенты  $K_{об}$  и  $n$ , тем эффективнее система водоснабжения, так как в этом случае сокращается объем сточных вод, требующих больших объемов воды для их разбавления.

Рис. 10. Схемы систем водоснабжения:

а — прямоточная; б — оборотная; в — повторная; г — комбинированная;  $W_{п}$  — объем полного водопотребления;  $W_{под}$  — объем подпитки;  $W_{бв}$  — объем безвозвратного водопотребления;  $W_{об}$  — объем оборотных вод;  $W_{сб}$  — объем сбросных вод;  $I_c$  — источник воды; П — потребитель воды;  $O_ч$  — очистка воды





Так, по сравнению с прямоточной системой водоснабжения при оборотной объемы сточных вод существенно меньше. Водоотведение включает объемы воды, используемой на продувку системы, а также объемы воды, сбрасываемой из системы водоснабжения для поддержания в ней необходимого солевого баланса (для "освежения" воды). Сбрасываются также воды, которые невозможно или нецелесообразно повторно использовать по технологическим или иным условиям.

При повторной схеме водоснабжения количество сбросных вод также меньше, чем при прямоточном водоснабжении предприятий, включенных в цикл повторного водоснабжения. Водоотведение включает только сбросные воды последнего звена. В некоторых случаях, например при использовании сточных вод предпоследнего звена для закачки в нефтеносные пласты, стока вообще может не быть.

Объемы сбросов зависят также от технологии промышленного производства и сокращаются при ее усовершенствовании.

Опыт эксплуатации повторных и оборотных систем водоснабжения показывает не только их экологическую, но и экономическую целесообразность, поскольку тщательная очистка стоков для доведения их до нормативного состояния не нужна, а требуется очистка их лишь до такого состояния, чтобы можно было использовать в производственном цикле.

### 6.3. Уменьшение непроизводительных потерь воды

Потери воды складываются из потерь по пути ее транспортирования, при использовании, а также потерь из водохранилищ, при аккумуляции воды.

Уменьшить потери воды при ее транспортировании к месту использования можно, увеличив КПД оросительных каналов, трубопроводов, так как объем потребления воды прямо пропорционален этому коэффициенту.

Поэтому одна из основных задач в орошаемом земледелии – не создание новых оросительных систем, а реконструкция старых, для того чтобы не менее 80...90 % воды использовалось растением.

Эффективно также повышение КПД в коммунальном и промышленном водоснабжении, так как здесь имеются резервы, особенно при водоснабжении сельских населенных пунктов и при обводнении пастбищ.

Существенны объемы потерь воды непосредственно в местах ее использования. Так, из одного протекающего водопроводного крана за год может потеряться столько же воды, сколько составляет водопотребление одного человека в год. Поэтому одним из путей рационального водопользования является борьба с этими потерями. Наиболее эффективным является экономический путь, например, введение платы за воду, если, конечно, за счет этого не повышается стоимость продукции (иначе никакого стимула экономить воду нет, за нее

заплатит покупатель продукции), поощрения за экономию воды и т. п.

Снизить потери воды из водохранилищ можно за счет уменьшения площадей мелководий, что кроме экономии воды позволяет решить и другие (природоохранные, социальные, экономические) проблемы. Но в то же время надо помнить, что уничтожение мелководий может нанести ущерб рыбному хозяйству в водохранилищах.

Борьба с потерями может быть не только в водном хозяйстве. Снижение потерь сельскохозяйственной продукции, электроэнергии позволит затратить меньше воды на производство сельскохозяйственной продукции и электрической энергии. Поэтому можно считать, что рациональное ведение хозяйства – один из основных путей экономии воды.

Существенным для сокращения непроизводительных потерь водных ресурсов может быть экономия воды при орошении. Она основана на том, что зависимость между продуктивностью и оросительной нормой нелинейна и имеет в зоне оптимальных оросительных норм малые производные, т. е. в этой зоне наблюдается значительное отклонение от биологически оптимальной оросительной нормы почти в два раза, что снижает урожай на 10...20 %.

Кроме этого, оптимизация водораспределения внутри вегетационного периода позволяет снизить оросительную норму еще на 15...20 %.

Завышенные оросительные нормы приводят не только к перерасходу воды, но и существенно снижают плодородие почвы. Особенно ярко это проявляется при засолении почв в связи с переполивом и при орошении черноземов водой плохого качества.

#### **6.4. Оптимальное размещение водоемких производств**

Рациональное размещение водоемких производств можно осуществить различными методами, например экспертными, математического моделирования и т. д.

Рациональное размещение водоемких производств основывается на *водохозяйственном районировании* территории страны, учитывающем не только водообеспеченность территории, но и характер водопотребления. Поскольку водность территории зависит от размеров и густоты источников поверхностных вод, каждый водохозяйственный район тяготеет к определенному водоему, а в ряде случаев (в бессточных районах) источником являются ресурсы подземных вод. На водохозяйственное районирование влияют также плотность населения, масштабы и характер промышленного и сельскохозяйственного производств, качество воды источников, степень их зарегулированности.

Рациональное размещение водоемких производств позволяет приблизить потребителя к водным ресурсам, снять напряженность водохозяйственного баланса в районах с дефицитом воды.

## 6.5. Защита водных ресурсов от истощения

Основным источником воды, как было показано выше, является устойчивая часть речного стока, поэтому повышение его – один из путей уменьшения дефицита воды. Естественные регуляторы речного стока – это леса и некоторые болота, поскольку почва там обладает высокой инфильтрационной способностью, вследствие чего поверхностный сток уменьшается и происходит интенсивное питание подземных вод, являющихся источником устойчивой части речного стока. Следовательно, большое значение имеют поддержание и повышение водорегулирующей функции леса за счет его правильной эксплуатации. Пример неблагоприятных антропогенных воздействий на лесные почвы – использование леса для выпаса, механизированные рубки леса с использованием тяжелых тракторов, что приводит к повреждению почвы, к утрате ею водоаккумулирующей способности и, как результат, к уменьшению водорегулирующего воздействия леса на поверхностный сток.

Для предупреждения от истощения и охраны водных ресурсов необходимы проведение агротехнических, гидротехнических методов борьбы с эрозией почв, поддержание лесистости речных водосборов, снегозадержание и другие мероприятия.

Например, очень эффективны лесонасаждения, способствующие дополнительному увлажнению полей, усилению водного питания, снижению поверхностного стока и эрозии.

## 6.6. Использование вод повышенной минерализации и морских

К водам повышенной минерализации относят подземные и дренажные. Используют их как источник пресной воды при искусственном опреснении или вместо пресных вод.

Подземные воды повышенной минерализации, расположенные чаще всего между зоной пресных вод и зоной рассолов, распространены практически по всей территории страны. По гидрогеологическим условиям их использование возможно более чем на половине территории. В некоторых районах подземные воды повышенной минерализации – основной, а иногда и единственный подземный источник водоснабжения и обводнения пастбищ, а в других соленоватые и соленые подземные воды – дополнительный источник водоснабжения.

Для хозяйственно-питьевого водоснабжения воды повышенной минерализации можно использовать только после их опреснения. Поэтому для широкого применения их в водохозяйственной практике необходимо снизить стоимость опреснения за счет наиболее эффективных методов, а также уменьшить отрицательные экологические последствия, вызванные изменением водно-солевого баланса вод, загрязнением природной среды остаточными рассолами.

Опреснение воды повышенной минерализации возможно путем превращения ее в пар с последующей конденсацией (термическое опреснение или дистилляция) либо ее вымораживанием. Возможно также получение пресной воды без изменения ее агрегатного состояния. Дистилляционные опреснители обычно устанавливают на тепловых или атомных электростанциях.

Метод ионного обмена для получения пресной воды из минерализованной без изменения ее агрегатного состояния может быть использован при небольшой минерализации исходной воды, например в системах химводоочистки тепловых электростанций, и для умягчения воды в системах теплоснабжения. Для опреснения вод повышенной минерализации возможно также применение электрохимических процессов, например электродиализа.

Электродиализные установки предназначены для получения пресной воды в маловодных районах для удовлетворения технологических и хозяйственно-питьевых нужд.

Опреснительные установки используют также для очистки шахтных вод, сточных вод в системах оборотного водоснабжения.

В будущем возможно более широкое применение экологически безвредных и практически не исчерпаемых источников энергии для опреснения воды: солнечной радиации, ветра и природного холода.

Возможно использование минерализованных вод и без их опреснения. Например, морскими и шахтными водами можно охладить оборудование, закачивать их в нефтяные пласты, а слабоминерализованными дренажными водами промывать орошаемые земли.

## 6.7. Регулирование стока

Речной сток, являющийся в силу большой активности водообмена основным источником, значительно изменяется в течение года и в течение ряда лет. Поверхностный сток, образующийся от таяния снежного покрова или от дождей, на большинстве рек питает их в паводок, а в остальное время не может быть использован без регулирования стока.

Для увязки годового ВХБ возможно многолетнее регулирование стока, которое служит для увеличения количества воды в маловодные годы за счет стока многоводных лет.

Для увязки месячных балансов применяют сезонное регулирование стока реки, т. е. перераспределение его на протяжении года путем накопления избытка воды в многоводные периоды и использования его в маловодные. При этом виде регулирования стока увязываются недельные и суточные балансы.

Расчет регулирования стока заключается в определении объемов водохранилища и соответствующих им уровней воды.

Методы расчетов регулирования стока разделяют на балансовые и обобщенные.

Балансовые методы расчета основаны на использовании длительных наблюдений за стоком, обобщенные – на использовании методов математической статистики и теории вероятностей.

Балансовый или календарный метод является наиболее простым, позволяющим вести различные водохозяйственные расчеты с желаемой степенью детализации. Недостаток этого метода – предположение неизменности гидрологического режима водотока в будущем.

## 6.8. Территориальное перераспределение стока

Местное регулирование стока может оказаться недостаточным для увязки ВХБ, особенно в маловодные годы. В этом случае дополнительные водные ресурсы получают, перераспределяя сток. Это возможно, если имеется асинхронность в дефицитах (избытках) воды на объединяемых водосборах (рис. 11). Так, если  $i$ -й участок получает воду нескольких водотоков, то возможно несовпадение режимов прохождения паводковых вод, минимальных расходов и т. п. В этом случае нужно оценить возможную асинхронность колебаний стока.

Для маловодных лет ( $P=50\%$ ) поступление воды на  $i$ -й участок с водотоков

$$V_i^{(l)} = K_{ac} \sum V_{i-1}^{(l)}, \quad (19)$$

где  $K_{ac}$  – коэффициент асинхронности стока  $l$  водотоков,  $K_{ac} \geq 1$ ;  $V_{i-1}^{(l)}$  – объем стока  $l$ -го водотока.

В связи с тем что на практике иногда  $K_{ac} > 1$ , в маловодные годы возможно использование асинхронности для получения дополнительного ресурса (дополнительного по сравнению со случаем, когда сток всех  $l$  водотоков синхронен и  $K_{ac} = 1$ ). Зависимости изменения неучтенных ресурсов для различных по водности лет показаны на рисунке 11.

Отметим, что в маловодные годы асинхронность стока различных рек покрывает дефициты ВХБ. Однако для этого необходимо создание единой ВХС, объединяющей эти реки.

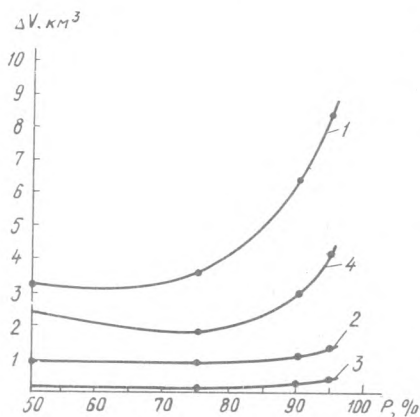


Рис. 11. Возможные дополнительные ресурсы при учете асинхронности стока для лет разной обеспеченности:

1 – Нева (Новосаратовка) – Волга (Горький); 2 – Северная Двина (Амрамкова) – Волга (Секарица); 3 – Ока (Калуга) – Дон (Задонск); 4 – Западная Двина (Даугавпилс) – Нева (Новосаратовка)

Пространственная неоднородность и асинхронность стока дают возможность в некоторых случаях перераспределения водных ресурсов по территории страны, если перечисленные выше мероприятия не приводят к увязке водохозяйственного баланса. Межбассейновое и внутрибассейновое перераспределение стока осуществлено более чем по 50 каналам общим объемом около 100 км<sup>3</sup>/год.

Поскольку по мере перераспределения воды по каналам качество ее может ухудшаться, предусматривают мероприятия по сохранению качества воды. Большое значение имеет повышение КПД систем перераспределения стока, для чего наряду с открытыми каналами предполагается более широкое применение трубопроводов, имеющих КПД большие, чем каналы. Однако объем стока, доступного для перераспределения без серьезных экологических последствий, достаточно ограничен, а стоимость этих мероприятий велика. Поэтому проекты перераспределения стока нуждаются в тщательном обосновании и должны рассматриваться как резерв, когда решить водообеспечение другим путем нельзя.

### 6.9. Использование вековых запасов воды

В полярных ледниках, айсбергах, горных ледниках и снегах накоплены большие запасы пресной воды, пригодной для их использования при проведении соответствующих мероприятий.

Так, предлагается находить в океане антарктические айсберги и буксировать их в страны, страдающие от безводья и маловодья, искусственно ускорять таяние ледников и горных снегов в истоках горных рек.

Кроме использования вековых запасов предлагается также использовать методы активного воздействия на процессы образования осадков в приземном слое воздуха. Один из методов такого воздействия – преобразование подстилающей поверхности Земли, например, посадкой леса или созданием искусственных препятствий высотой 100...500 м, которые, повышая шероховатость местности, оказывают влияние на выпадение осадков.

Недостатки перечисленных методов:

использование ледников является тратой основного "капитала", накопленного в течение тысячелетий, нарушением естественного процесса круговорота воды в природе;

низкая экономическая эффективность этих мероприятий, так как в результате больших и дорогостоящих усилий получают относительно небольшие объемы воды.

Поэтому основное условие достаточного обеспечения водой – рациональные ведение хозяйства и природопользование. Для этого введены плата за пользование водой, штрафы за сброс недостаточно очищенных сточных вод, за экологические ущербы. Для рационального природопользования необходимо соблюдение требований нормативных документов (норм, стандартов, законов и т. п.).

## Контрольные вопросы и задания

1. Чем водохозяйственный баланс (ВХБ) отличается от водного?
2. Какой ВХБ (среднегодовой, расчетный, годовой, месячный, недельный, суточный) составляют в первую очередь и почему, если предполагается использовать сезонное регулирование стока?
3. Какие экономические, экологические и социальные ограничения могут появляться при обосновании величины приходной части ВХБ?
4. Что служит верхней и нижней границей у расходной части ВХБ?
5. Почему гидрохимический баланс составляют после водохозяйственного?
6. Что понимают под термином "увязка" баланса?
7. Почему полезные объемы водохранилища нецелесообразно рассчитывать до увязки годового ВХБ?

## Глава 3

### ВОДОХОЗЯЙСТВЕННЫЕ КОМПЛЕКСЫ (ВХК)

Организацию управления водохозяйственной системой (ВХС) должен осуществлять водохозяйственный комплекс (ВХК), так как использование водных ресурсов в больших масштабах сопряжено с изменением установившихся связей в природе и системе народного хозяйства. Эти изменения затрагивают интересы многих отраслей, вызывая наряду с положительным эффектом и отрицательные последствия. Сведение отрицательных последствий до минимума возможно, если рассматривать всю ВХС как единый комплекс и проектировать ее на основе долгосрочных прогнозов требований различных отраслей к количеству и качеству воды, реальных природных условий и при этом учитывать возможность их изменения.

В то же время ВХК можно рассматривать как совокупность мероприятий и сооружений по рациональному использованию водных и связанных с ними природных ресурсов, позволяющих оптимально удовлетворить всех водопользователей имеющимся ресурсом воды.

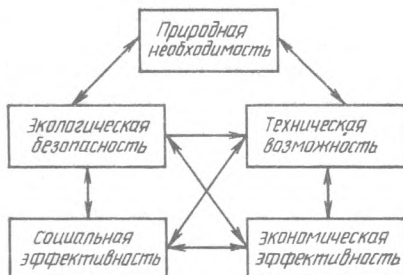
ВХК (согласно нормативным документам) – совокупность различных отраслей народного хозяйства, совместно использующих водные ресурсы одного водного бассейна. Формирование комплекса, т. е. обоснованный выбор состава и числа участников, – одна из сложнейших предпроектных задач.

При обосновании ВХК необходимо учитывать связанные между собой части: природную, техническую, экономическую, социальную и экологическую (рис. 12).

В *природной части* обосновывают необходимость и возможность функционирования ВХК. Устанавливают потребности различных отраслей в количестве и качестве водных ресурсов. Исходя из наличных водных ресурсов, определяют необходимость создания ВХК в данном районе.

В *технической части* рассматривают возможность создания систе-

Рис. 12. Схема обоснования создания ВХК



мы взаимосвязанных технических решений, сооружений, мероприятий, обеспечивающих функционирование ВХК в конкретных местных условиях.

*Экономическая часть* учитывает интересы всех затрагиваемых отраслей и отдельных водопользователей. В ее задачи входит получение максимального экономического эффекта и минимального ущерба от недополучения воды. Эта часть обоснования ВХК должна позволять объективно распределять капитальные вложения и издержки, включая затраты на социальные и экологические нужды.

Обоснование *социальной части* ВХК должно включать оценку национальных, нравственных и медицинских аспектов, переселения людей из зоны влияния ВХК в другие районы.

В *экологической части* обоснования ВХК оценивают ущербы, наносимые ВХК природным комплексам.

При правильном обосновании ВХК должен обеспечить наибольшую экономическую эффективность в целом, а не для какой-либо отдельной отрасли; не допускать вредного воздействия на окружающую среду. Сооружения участников ВХК должны способствовать охране вод от загрязнения и истощения; обеспечивать достаточно простую и надежную эксплуатацию.

Участниками или компонентами ВХК являются: водоснабжение, водоотведение, гидротехнические мелиорации, гидроэнергетика, водный транспорт, лесосплав, рыбное хозяйство, здравоохранение, водный туризм. К гидротехническим мелиорациям кроме оросительных и осушительных относят защиту от наводнений, борьбу с водной эрозией, селявыми потоками, оползнями и разрушением берегов, а также с заболачиванием и засолением почв. Учитывая существующую экологическую обстановку, в число участников ВХК целесообразно включать и природные комплексы. Участников ВХК условно можно разделить на водопотребителей и водопользователей.

## 7. ВОДОПОТРЕБИТЕЛИ И ВОДОПОЛЬЗОВАТЕЛИ ВХК

При *водопотреблении* воду изымают из водных объектов, часть которой после использования возвращается в этот же или другой водный объект (например, испаряясь), а часть теряется безвозвратно, так как входит в состав вырабатываемой продукции.

Основными водопотребителями являются промышленность,



коммунальное водоснабжение и сельскохозяйственное орошение. Последнее потребляет около половины воды, используемой в народном хозяйстве. Возвратные воды имеют, как правило, иной качественный состав, и для возможности дальнейшей биологической очистки и использования этих вод их необходимо разбавить.

При *водопользовании* воду не изымают из водных объектов. Водопользование имеет место в гидроэнергетике, водном транспорте, сплаве леса, рекреации, частично в рыбном хозяйстве.

Однако по мере более глубокого использования водных ресурсов грани между водопотребителями и водопользователями стираются. Так, при создании энергетических водохранилищ значительная часть воды теряется на испарение и фильтрацию и пропадает для остальных участников комплекса. Такое же явление в больших масштабах наблюдается и на водохранилищах, которые используют в системе охлаждения тепловых и атомных электростанций. Аналогичные доводы можно привести относительно использования воды в рыбном хозяйстве, когда для нереста затопливают обширные мелководья, хорошо прогреваемые солнцем, с которых происходит значительное испарение воды.

Поэтому более правильно будет объединить эти две категории в одну с общим названием – водопользователи.

В водопользовании существенны водопотребление и водоотведение. *Водопотреблением* называют потребление воды из водного объекта или систем водоснабжения, а *водоотведением* или сбросом, сточных вод – удаление сточных вод за пределы населенного пункта, предприятия или других мест использования. В объем водоотведения входит суммарное количество всех видов сточных вод, отводимых непосредственно в водоемы (водоисточники), подземные горизонты и бессточные впадины, на очистку, а также передаваемых на очистку другим организациям.

В водопотреблении учитывают не только непосредственное использование воды, но и потери на испарение и фильтрацию из каналов и водохранилищ.

Водопотребление характеризуется (Водное хозяйство, 1988):

общим водопотреблением – суммой забора свежей и оборотной воды за единицу времени (год, сутки, час, секунду);

забором свежей воды – водозабором из водного объекта;

забором оборотной воды – водозабором из системы замкнутого водоснабжения;

водоотведением – сбросом в водный объект, в замкнутые понижения или подземные горизонты;

безвозвратным водопотреблением – забором свежей воды за вычетом водоотведения;

объемами сброса загрязнений – объемами загрязняющих веществ в сбрасываемой воде за вычетом содержания этих веществ в воде, забираемой из источника;

тепловым загрязнением – количеством тепла, сбрасываемого в водный объект. Определяют по расходу сбрасываемой воды и повышенной температуры в сбросных водах по сравнению с температурой забираемой воды.

Водопользователи характеризуются величиной необходимых расходов воды (гидроэнергетика) и уровней (судоходство, гидроэнергетика, рыбное хозяйство, рекреация, природные комплексы), а также влиянием их на качество воды.

Несогласованность водопотребления и водоотведения между участниками (компонентами) ВХК приводит к противоречиям. Так, водный транспорт заинтересован в поддержании судоходных глубин в нижнем бьефе ГЭС в навигационный период, а гидроэнергетика, наоборот, в накоплении воды в водохранилище для более интенсивного использования ее в осенне-зимний пик загрузки. Во время же половодья гидроэнергетика заинтересована в накоплении воды в водохранилище, а рыбное хозяйство требует значительных попусков из водохранилища для поддержания оптимальных глубин нерестилищ и мелководий, в которых обитает рыба. Разрешают эти противоречия при формировании ВХК. Одно из важнейших условий его оптимального функционирования – устранение этих противоречий.

Существуют противоречия и в требованиях к качеству используемой воды. Гидроэнергетика, судоходство, лесосплав не предъявляют жестких требований к загрязненности воды. Для здравоохранения, водоснабжения, рыбного хозяйства и орошения, отдыха на воде качество воды имеет существенное значение, поэтому и это учитывают на стадии формирования ВХК.

## 8. КЛАССИФИКАЦИЯ ВХК

ВХК классифицируют по масштабам их распространения, типам сооружений, числу участников (рис. 13).

Так, по масштабам распространения можно выделить глобальные, или межгосударственные, государственные, зональные, бассейновые и ВХК части бассейнов.

К глобальным, или межгосударственным, можно отнести проекты использования водных ресурсов пограничных рек (Прут, Припять и др.) или рек, проходящих транзитом через ряд стран (Дунай). В дальнейшем можно рассматривать проекты межгосударственного использования климатических ресурсов, и в частности запасы паров в атмосфере при искусственной стимуляции осадков, проекты использования водных ресурсов айсбергов и ледников и ряд других.

К государственным можно отнести ВХК, возникающие при реализации таких проектов, как создание единой ВХС страны (ЕВХС). В США, Англии, Франции существуют такие системы или части их; в России такую систему только начинают создавать.

Общим признаком государственного ВХК может служить рассмот-

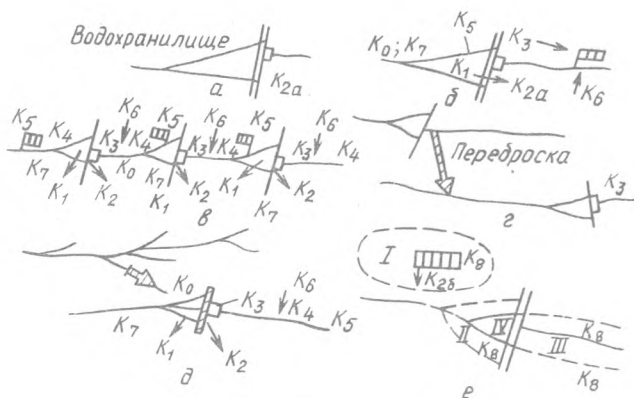


Рис. 13. Типы ВХК:

а, б — одноузловые отраслевой и межотраслевой; в — каскадный межотраслевой; г — межбассейновый отраслевой с локальной переброской стока; д — межбассейновый многоотраслевой; е — природоохранный;  $K_0$  — здравоохранение;  $K_1$  — водоснабжение;  $K_{2a}$  — орошение;  $K_{2b}$  — осушение;  $K_3$  — энергетика;  $K_4$  — транспорт;  $K_5$  — рыбное хозяйство;  $K_6$  — водоотведение;  $K_7$  — отдых;  $K_8$  — природные комплексы; зоны влияния: I — осушения (понижение УГВ, переосушка, снижение продуктивности лесов); II — водохранилища (подтопление, мелководья, переработка берегов); III — зарегулированного расхода в русле реки (отсутствие паводков, пересыхание поймы, засоление земель); IV — водоотведение для контроля качества воды

рение водохозяйственной проблемы в масштабах всей страны на основе долгосрочных прогнозов экономического развития государства с учетом общих политических и социальных аспектов.

Зональные ВХК предусматривают решение водохозяйственных проблем в том или ином экономическом регионе страны. Основная цель такого комплекса — совершенствование водного хозяйства и наиболее полное и эффективное использование его возможностей для развития данного экономического района.

Бассейновые ВХК наиболее полно разработаны как в мелиорации, так и в энергетике. Практически по всем бассейнам крупных рек составлены Схемы комплексного использования и охраны водных и земельных ресурсов с перспективой на 15...20 лет.

В бассейновых схемах ВХК более полно учитывают природные и социально-экономические особенности рассматриваемых районов.

ВХК части бассейнов формируют после рассмотрения состава ВХК более высоких порядков. Рассматривают и формируют ВХК части бассейнов на основе проектных решений, уточняя схемы использования участков реки: более детально изучают притоки основной реки на данном участке, рассматривают возможности их комплексного использования, учитывают возможности совершенствования природной среды, устранения эрозийных процессов и другие вопросы водно-земельного благоустройства и водопользования.

ВХК можно классифицировать также по типам сооружений и по числу участников (см. рис. 13). Одноузловые отраслевые ВХК имеют либо энергетическое, либо ирригационное назначение.

Однако некомплексные гидроузлы практически не создают и чаще встречаются одноузловые многоотраслевые ВХК (см. рис. 13).

По мере развития народного хозяйства в данном бассейне одноузловые ВХК трансформируются в многоузловые, или каскадные межотраслевые ВХК (см. рис. 13). Это наиболее распространенный тип ВХК в нашей стране и за рубежом. Такие водохозяйственные комплексы сформированы на каскадах гидроузлов по рекам Волге, Днепру, Свири, Нарыну и др. Формирование такого ВХК завершается с окончанием строительства всего каскада, поэтому получение полного народнохозяйственного эффекта может затянуться на ряд лет. Однако такие комплексы стимулируют интенсивное развитие народного хозяйства в данном районе, способствуют рациональному использованию водных ресурсов.

В том случае если водных ресурсов одного бассейна не хватает для формирования ВХК, то возможно создание межбассейнового отраслевого (см. рис. 13), а затем и межбассейнового многоотраслевого ВХК (см. рис. 13). Крупномасштабность таких мероприятий затрагивает обычно ряд отраслей, сказывается на изменении природной среды, экономических и социальных аспектах. Такой ВХК сформирован на базе Каракумского канала, участниками которого являются ирригация, водный транспорт, рыбоводство, сельское хозяйство, коммунально-бытовое водоснабжение, обводнение. Проекты ВХК более широкого масштаба будут реализованы при создании единой водохозяйственной системы определенных регионов, а потом и всей страны в целом. При полном выполнении этих проектов объем изъятия стока значительно возрастет. Такие изменения естественных условий могут дать не только положительный, но и отрицательный эффект.

В связи с тем что ВХК тем или иным способом влияет на окружающую среду, особенно при водоотведении, необходимо выделение еще одного типа ВХК – водоохранного, который должен функционировать в системе природоохранного комплекса. *Водоохранным комплексом* называют систему сооружений и устройств для поддержания требуемого количества и качества воды в заданных створах или пунктах водных объектов. Водоохранные комплексы включают объекты осушения, водохранилища, поймы, загрязненные участки водных объектов и сооружения, предотвращающие отрицательные влияния ВХК.

## 9. ОСНОВНЫЕ УЧАСТНИКИ ВХК. ИХ ТРЕБОВАНИЯ К ВОДНЫМ РЕСУРСАМ И РЕЖИМУ ВОДОИСТОЧНИКОВ

### 9.1. Коммунально-бытовое хозяйство

**Особенности коммунально-бытового водоснабжения. Требования к количеству и качеству воды.** Доля коммунально-бытового водоснабжения в общем водопотреблении невелика, но значение его огромно. Водоснабжение населения — важнейшая забота любого города или села. Отсутствие чистой питьевой воды является одной из главных причин болезней. В то же время практически половина населения мира не имеет надежных источников питьевой воды. Вот почему 80-е годы были объявлены Международным десятилетием питьевого водоснабжения и санитарии.

В нашей стране принцип приоритета коммунально-бытового водоснабжения закреплён в Основах водного законодательства и заключается в том, что в любых условиях население должно быть обеспечено водой в первую очередь. В водохозяйственной практике в отношении коммунально-бытового водоснабжения принимают самый высокий показатель обеспеченности (99 % по числу бесперебойных лет).

Коммунально-бытовое водоснабжение связано с непосредственным потреблением воды населением (для питья, в составе пищевых продуктов), с использованием воды для хозяйственно-бытовых целей (стирка, уборка, мойка и т. п.), для удовлетворения нужд коммунально-бытового хозяйства (прачечные, парикмахерские и т. п.), городского транспорта, строительных организаций.

Коммунально-бытовое хозяйство как водопотребитель имеет ряд особенностей. Это прежде всего предъявляемые им высокие требования к качеству воды как по физическим свойствам (температура, прозрачность, цветность, запах, привкус), так и по химическим показателям (кислотность, жесткость, величина сухого остатка, содержание свинца, мышьяка, фтора, меди и других элементов). Важнейшим требованием является отсутствие в воде патогенных микробов, по содержанию которых воду делят на несколько типов (безупречно здоровая, здоровая, подозрительная, сомнительная, нездоровая, совершенно непригодная). В 1937 г. в нашей стране был разработан первый в Европе стандарт качества очищенной питьевой воды, который пересматривали несколько раз в соответствии с новыми представлениями о значении качества воды для здоровья человека.

Наилучшими, удовлетворяющими требованиям к качеству являются межпластовые артезианские подземные воды, в которых содержание химических веществ и патогенных микробов невелико. На них почти не влияют социально-бытовые (плотность населения, развитие промышленности, транспорта и т. п.) и природные (климатические, сезонные) факторы. В отличие от них на грунтовые воды, расположенные неглубоко под землей, эти факторы оказывают влияние, ухудшая

органолептические свойства воды (запах, цвет, мутность). Однако их качество значительно лучше, чем поверхностных вод, которые наименее пригодны для питьевого водоснабжения без специальной подготовки, так как сильнее подвержены опасности загрязнения. Для приведения качества воды в соответствие санитарно-гигиеническим требованиям ее подвергают специальной обработке (водоподготовке): фильтруют, коагулируют (для перевода в осадок примесей), хлорируют или фторируют с целью дезинфекции, обогащают аммиаком для улучшения вкусовых качеств.

Следующая способность коммунально-бытового водоснабжения – довольно равномерное потребление воды в течение года и резко неравномерное в течение суток.

При повышении температуры воздуха потребление воды несколько возрастает, однако сезонные колебания не превышают 15...20%. В то же время суточные колебания значительны, так как более 70% воды потребляется днем. Обычно для учета этих колебаний в расчетах водопотребления используют коэффициент суточной неравномерности  $K_{сут}$  – отношение максимальной суточной нормы водопотребления к среднесуточной и коэффициент часовой неравномерности,  $K_{ч}$  – отношение максимального часового водопотребления к среднему. Коэффициент суточной неравномерности не превышает 1,2, в то время как часовой может достигать 1,8...2.

Нормы хозяйственно-питьевого водоснабжения зависят от уровня благоустройства жилого фонда населенного пункта и климатических условий, а часто и исторических. Они характеризуются суточным объемом воды, приходящимся на одного жителя, и зависят от благоустройства зданий. Некоторые из действующих норм приведены ниже.

| Степень благоустроенности зданий                           | Норма водопотребления, л/сут на 1 человека |
|--|--|
| Без водопровода и канализации                              | 30...50                                    |
| Водопровод, канализация, без ванн                          | 125...160                                  |
| Водопровод, канализация, ванны с газовыми колонками        | 160...230                                  |
| Водопровод, канализация, центральное горячее водоснабжение | 230...350                                  |

Большие нормы относятся к южным районам, меньшие – к северным.

Общий расход воды (л/с) для удовлетворения хозяйственно-питьевых нужд населения

$$Q = \frac{N q K_{сут} K_{ч}}{86,4 \cdot 10^3}, \quad (20)$$

где  $N$  – численность населения, человек;  $q$  – среднесуточная норма водопотребления на 1 человека, л/сут;  $K_{сут}$ ,  $K_{ч}$  – коэффициенты суточной и часовой неравномерности;  $86,4 \cdot 10^3$  – число секунд в сутках.

Для прогнозирования водопотребления в коммунально-бытовом хозяйстве используют данные о прогнозе численности населения и удельного водопотребления, определяемом чаще всего по логистическим моделям, выбор которых обусловлен гипотезой о стабильности удельного водопотребления в перспективе при достижении определенного достаточно высокого уровня потребления воды. Рост водопотребления связан с развитием урбанизации и повышением степени благоустройства в сельских населенных пунктах.

Расходы на полив в населенных пунктах и на промышленных предприятиях зависят от типа покрытия, способа полива, вида насаждений и климатических условий и колеблются от 0,3 до 15 л/м<sup>2</sup> за полив.

**Предпосылки включения коммунально-бытового водоснабжения в ВХК.** При включении коммунально-бытового водоснабжения в состав участников ВХК необходимо учитывать его требования к уровню воды в водохранилище, а также влияние на других участников.

Уровненный режим водохранилищ должен обеспечить нормальную работу водозаборных сооружений. При этом исходят из следующих требований: заглубление всасывающей трубы под уровень воды должно быть таким, чтобы в трубу не поступал воздух; по санитарным условиям забор воды желательно осуществлять из более глубоких слоев во избежание засасывания загрязненной воды, находящейся у поверхности. В то же время нельзя забирать воду и из придонных слоев, так как в них содержится больше взвешенных частиц, различных органических соединений, они имеют меньшее количество кислорода.

С учетом этих требований определяют требования коммунально-бытового водоснабжения к минимальному уровню воды в водохранилище.

При заборе воды из нижних бьефов гидроузлов иногда необходимы попуски из водохранилища для обеспечения необходимых условий в нижнем бьефе. Так, бесперебойное водоснабжение ряда населенных пунктов, забирающих воду из нижнего бьефа Ириклинского комплексного гидроузла на р. Урал, гарантируется попусками воды из его верхнего бьефа. Эти попуски являются энергетико-водоснабженческими и осуществляются через турбины Ириклинской ГЭС.

Расходы водоснабженческих попусков зависят от гидрологических условий, складывающихся в конкретный год. При комплексных попусках учитывают интересы всех водопотребителей, но в первую очередь (без экономического обоснования) коммунально-бытового хозяйства.

Как участник ВХК коммунально-бытовое хозяйство вступает в противоречие с такими участниками, как промышленность и орошаемое земледелие, сточные воды которых неблагоприятно действуют на качество воды. Такое же влияние оказывают сельскохозяйственное водоснабжение (особенно животноводческие комплексы), водный

транспорт и рекреация. На некоторых водохранилищах, используемых главным образом для целей водоснабжения, запрещается строительство учреждений отдыха из-за большого загрязнения их вод при рекреационном использовании.

В свою очередь, сточные воды коммунально-бытового хозяйства неблагоприятно влияют на качество воды в местах сброса, что может отрицательно сказаться на таких участниках ВХК, как рыбное хозяйство, рекреация, промышленность, а также на нижерасположенных населенных пунктах. Поэтому недопустим сброс неочищенных сточных вод. Необходимо повсеместное устройство канализации, улучшение очистки, а также повторное использование сточных вод для нужд промышленности и орошения.

**Пути экономии воды в коммунально-бытовом хозяйстве.** Одной из главных мер является борьба с утечками воды. Только в жилых зданиях через санитарно-техническую арматуру они могут достигать четверти объема воды, отпускаемого населению. Немалые потери возникают из-за поврежденных водопроводных магистралей, особенно при проведении земляных работ. Средние потери достигают 20 %.

Большое значение имеет внедрение раздельного водопровода для нужд коммунального водоснабжения и для промышленного водоснабжения. Вода для хозяйственно-питьевых нужд должна подаваться с высокой степенью надежности, а качество отвечать стандарту. Вода для коммунальных нужд (мытьё машин, полив улиц, приусадебных участков и т. п.) может быть более низкого качества, а подача ее иметь меньшую степень надежности. Для коммунальных нужд можно использовать воду, полученную из доочищенных коммунальных стоков.

Коммунально-бытовое водоснабжение характеризуется относительно невысоким безвозвратным потреблением. Более широкое внедрение канализации позволит увеличить количество сточных вод, которые можно использовать повторно (после соответствующей очистки) для нужд промышленности или орошения. Это даст общую экономию воды, используемой потребителями.

Особенно актуально повторное использование очищенных городских сточных вод для крупных промышленных центров. Например, использование городских сточных вод на промышленных предприятиях юго-восточной зоны Москвы после очистки их на Курьяновской очистной станции позволяет сэкономить питьевую воду и снизить ущерб от сброса недоочищенных сточных вод в р. Москву, уменьшить объем воды, необходимой для разбавления городских сточных вод. А использование городских сточных вод для орошения сельскохозяйственных полей дает значительный эффект, так как городские сточные воды содержат большое количество органических веществ, которые являются удобрениями для сельскохозяйственных растений. При этом обеспечивается транспорт удобрений с водой, а в растворенном виде органические вещества наиболее эффективно усваиваются растениями.



Кроме того, обеззараживание сточных вод в почве наиболее эффективно, так как окислительные и микробиологические процессы там происходят интенсивнее, чем в воде. Нерационально отравлять водоемы органическими удобрениями, вызывающими их эвтрофирование, вместо того, чтобы использовать их для удобрения полей. Вместе с тем здесь необходимы строгое нормирование поливов и специальная подготовка оросительной сети. Необходимо также, чтобы подземные воды не загрязнялись водами сельскохозяйственных полей орошения (ЗПО). При соблюдении этих условий не происходит поступления загрязненных стоков в водоемы.

## 9.2. Оросительные мелиорации

**Особенности орошения как участника ВХК.** Интенсивный рост населения, особенно в развивающихся странах, происходит одновременно с уменьшением пахотных земель на душу населения с 0,4 га в 1972 г. до 0,25 га к 2000 г. Необходимость обеспечения населения Земли продуктами питания требует развития интенсивных способов животноводства и выращивания сельскохозяйственных культур.

Сельскохозяйственные земли составляют десятую часть суши, из них 16 % пашни орошают, получая с этих площадей от 30 до 50 % сельскохозяйственной продукции. Тенденции развития орошения на разных континентах в XX в. показано в таблице 7.

7. Развитие орошения в XX в. (млн га)

| Континент           | 1900 г. | 1940 г. | 1950 г. | 1960 г. | 1970 г. | 1985 г. | 2000 г. |
|---------------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| Европа              | 3,9     | 8       | 10      | 15      | 21,8    | 36,0    | 45      |
| Азия                | 30      | 50      | 65      | 97      | 110,7   | 138,3   | 300     |
| Африка              | 2,5     | 4       | 5       | 7       | 7,6     | 10,6    | 18      |
| Северная Америка    | 4       | 9       | 13      | 17      | 21,0    | 25,4    | 35      |
| Южная Америка       | 0,5     | 1,5     | 3       | 5       | 5,7     | 8,1     | 15      |
| Австралия и Океания | 0       | 0,3     | 0,5     | 1       | 1,0     | 1,9     | 3       |
| Всего в мире        | 40      | 73      | 96      | 142     | 167,4   | 220,3   | 420     |

Интенсивное развитие орошения как в нашей стране, так и за рубежом все больше и больше сдерживается не отсутствием удобных для орошения земель, а нехваткой водных ресурсов.

Только в развитых странах водопотребление на нужды сельского хозяйства составляет около 600 км<sup>3</sup>.

Потенциальные возможности развития мелиорации велики. До 2000 г. площади орошаемых земель можно расширить до 30...32 млн га. На этих землях можно получить 115...125 млн т кормов в пересчете на кормовые единицы, 55...60 млн т зерна, в том числе кукурузы до 18...20 млн т.

Большое значение оросительные мелиорации имеют в развитии комплексных мелиораций в нашей стране. Оросительные системы, снабженные устройствами для подачи удобрений с оросительной водой, системами мелкодисперсного дождевания, для борьбы с заморозками и суховеями, могут существенно увеличить продуктивность орошаемых земель и повысить плодородие почв.

Учитывая, что за последние 20 лет в бывшем СССР в результате потери земель за счет урбанизации (повышение роли городов в развитии общества), водной и ветровой эрозии, заполнения водохранилищ площадь пашни на душу населения сократилась с 1,06 до 0,9 га. Интенсификация сельского хозяйства за счет комплексных мелиораций — наиболее реальное средство для получения требуемого объема продукции.

Ежегодные затраты водных ресурсов на орошение составляют 130...150 км<sup>3</sup>. Сравнительно большие объемы ввода орошаемых земель потребуют дополнительных водных ресурсов. Поэтому необходимо более экономно использовать водные ресурсы при орошении, что даст возможность несколько сократить безвозвратное водопотребление. В перспективе безвозвратное водопотребление на орошение может возрасти.

Большие капитальные вложения и дефицит воды требуют *количественного природно-экономического обоснования намечаемых инженерных мероприятий*. Кроме того, неудачно выполненные проектные решения, низкое качество строительных работ и неправильная эксплуатация водохозяйственных сооружений и объектов, используемых для орошения, могут привести к распространению малярии и других заболеваний, снижению плодородия почв и засолению, осолонцеванию и заболачиванию. Все это требует разработки теории количественного обоснования необходимости и эффективности мелиорации на всех стадиях проектирования — от схемы комплексного использования водных ресурсов и до технического проекта.

**Обоснование необходимости и эффективность мелиорации. Предпосылки включения в ВХК.** Включение в число участников ВХК любой отрасли народного хозяйства должно быть экономически обосновано, например здравоохранение и коммунально-бытовое водоснабжение включают в первую очередь.

Обоснование включения гидроэнергетики, транспорта, промышленности относительно просто, так как потребность в воде в каждый момент времени довольно точно определена и при надежном прогнозе стока нетрудно рассчитать выпуск продукции, прибыль и экономическую эффективность.

Включение оросительных мелиораций в состав ВХК не всегда очевидно по ряду причин. С одной стороны, режим водопотребления растений зависит от погодных условий, и поэтому нельзя однозначно определить необходимое количество ресурса в каждый момент вегетации. Особенно контрастно это проявляется в зоне неустойчивого

увлажнения. С другой стороны, урожай орошаемого поля зависит не только от наличия водных ресурсов, но и от величины фотосинтетически активной радиации, теплового и питательного режимов, своевременности проведения агротехнических мероприятий и других факторов. Большая часть из этих факторов имеет стохастический характер. Поэтому включение орошения в состав участников ВХК должно быть обосновано с учетом стохастической природы основных факторов, и в первую очередь водного.

Обоснование необходимости мелиораций можно сформулировать следующим образом: определить вероятность несоответствия условий внешней среды с оптимальным диапазоном требований растений в каждый момент вегетации.

Для одномерного случая мелиораций и при нормальном законе распределения факторов (в данном случае влагозапасов) обоснование необходимости мелиораций заключается в расчете вероятности орошения  $\bar{P}_{1w}$  и осушения  $\bar{P}_{\downarrow w}$ . Если  $\bar{P}_{1w}$  и  $\bar{P}_{\downarrow w}$  больше 0,3...0,5, то не менее чем один раз в 2...3 года необходимы какие-либо мелиоративные воздействия, т. е. создание мелиоративных систем и использование для их работы определенного объема водных ресурсов. Однако необходимость мелиорации еще не определяет ее эффективности.

Эффективность мелиорации можно рассчитать на основе величин фотосинтетически активной радиации с учетом ограничений на факторы, которые можно регулировать с помощью современных мелиоративных систем лишь частично или нельзя совсем при данном развитии техники. Последовательность расчета может быть следующей:

вычисляем максимальную продуктивность сельскохозяйственной культуры  $U_{\max}$ , которая линейно зависит от фотосинтетически активной радиации и показывает урожай при условии, что все остальные факторы внешней среды для растения оптимальны в течение всей вегетации:

$$U_{\max} = (R - R_0) / \alpha, \quad (21)$$

где  $R$  – средняя многолетняя фотосинтетически активная радиация (ФАР) в данном географическом пункте;  $R_0$  – ФАР, при которой данная культура не дает урожая;  $\alpha$  – коэффициент пропорциональности;

находим параметры зависимости продуктивности сельскохозяйственных культур от факторов внешней среды, которую можно записать так (рис. 14):

$$S(\varphi) = (\varphi / \varphi_{\text{opt}})^{\gamma \varphi_{\text{opt}}} (1 - \varphi) / (1 - \varphi_{\text{opt}})^{\gamma (1 - \varphi_{\text{opt}})}, \quad (22)$$

где  $S(\varphi)$  – относительная продуктивность (относительная урожайность),  $S = U / U_{\max}$ ;  $\varphi$  – текущее значение фактора;  $\varphi_{\text{opt}}$  – оптимальное значение фактора, при котором  $S = 1$ ;  $\gamma$  – параметр, характеризующий степень саморегулирования растения;

определяем параметры зависимости, описывающей изменение фактора от потока ресурса (для орошения – зависимости изменения

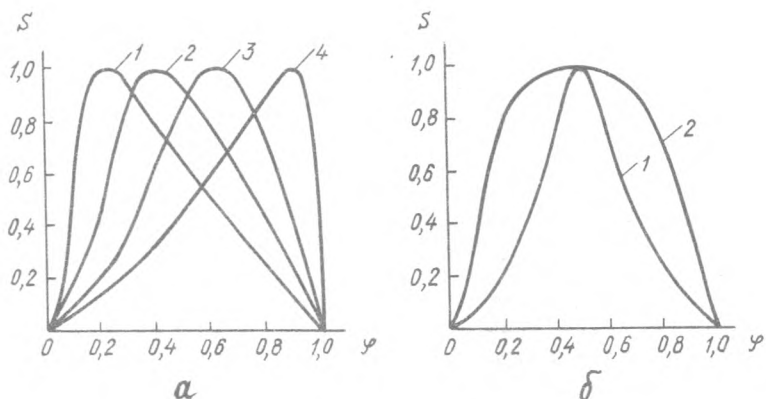


Рис. 14. Зависимость относительной продуктивности сельскохозяйственных растений от водного фактора:

*a* — в различные периоды вегетации (1, 2, 3, 4); *б* — для различных культур: 1 — влаголюбивые культуры; 2 — засухоустойчивые культуры

продуктивных влагозапасов в почве от оросительной нормы). В первом приближении такую зависимость описывают уравнением

$$w = (M/M_{opt}) (w_{opt} - w_0) + w_0, \quad (23)$$

где  $M$ ,  $M_{opt}$  — текущая биологически оптимальная и оросительная нормы;  $w_{opt}$  — эффективные оптимальные влагозапасы;  $w_0$  — равновесная влажность, при которой влагообмен глубоких слоев с расчетным корнеобитаемым слоем равен нулю;

получаем на основе зависимостей (21) и (23) функцию эффективности мелиораций, связывающую относительную продуктивность с потоком ресурса (для гидромелиораций с оросительной нормой):

$$S = \left[ \frac{(w_{opt}^* - w_0)(M/M_{opt}) + w_0}{w_{opt}^*} \right]^{\gamma^* w_{opt}^*} \times \left\{ \frac{1 - [(w_{opt}^* - w_0)(M/M_{opt}) + w_0]}{1 - w_{opt}^*} \right\}^{\gamma^* (1 - w_{opt}^*)}, \quad (24)$$

где  $w_{opt}^*$  и  $\gamma^*$  — эффективная оптимальная влажность и степень саморегулирования растений.

Графическое изображение зависимости (24) (рис. 15) показывает, что, начиная с некоторого значения оросительной нормы  $M > M_{эф}$ ,  $S = 0,8$ , прибавки урожая резко снижаются и при  $M_{opt}$  по сравнению с эффективной продуктивностью увеличиваются только на 10...20%. Таким образом, снижение оросительных норм от биологически оптимальных до экономически эффективных дает экономию ресурса в

2 раза при незначительном снижении урожая. Однако это можно сделать только на управляемых мелиоративных системах, где учет и распределение воды автоматизированны и отсутствуют непроизводительные потери (холостые сбросы, фильтрация из каналов и пр.).

**Основные источники и объемы воды, необходимые для орошения.** По А. Н. Костякову, источниками орошения могут быть воды рек, озер, местного поверхностного стока и подземные.

Источник орошения выбирают на основе технико-экономического расчета при условии, что он удовлетворяет не только по количеству воды, но и по ее качеству. При выборе источников орошения необходимо знать: расходы воды в течение оросительного периода в многолетнем разрезе; суммарный сток за расчетный период и его колебания в разные годы; положение источника и уровней воды в нем по отношению к орошаемой площади; качество воды, характеризующееся содержанием крупных наносов и солей.

Эти характеристики водоисточника определяют особенности ВХС: возможные размеры орошаемой площади; необходимость и степень регулирования стока; характер оросительной системы по способу подвода воды (самотечная или с машинным водоподъемом); необходимость борьбы с наносами и опреснения оросительной воды.

Особые требования предъявляют к качеству оросительной воды. Например, известно, что кальций, растворенный в оросительной воде и являющийся хорошим коагулянт, способствует созданию водопроочной структуры и благоприятных водно-физических свойств почвы. Вода "плохого" качества разрушает почвенную структуру, приводит к засолению и осолонцеванию почв, чему способствует наличие в воде ионов натрия и магния.

Выделяют пять классов и групп воды по химическому составу: I класс — пригодны для всех культур и типов почв, концентрация

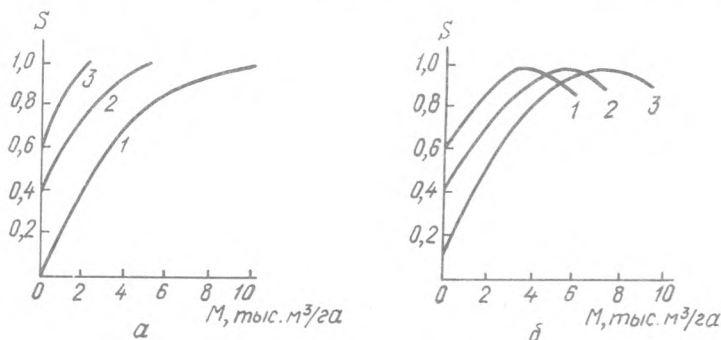


Рис. 15. Зависимость относительной продуктивности от оросительной нормы:

а — в разных географических зонах: 1 — пустынная; 2 — степная; 3 — лесостепная; б — для лет разной обеспеченности  $P_1$  дефицита водного баланса: 1 — 50%; 2 — 75%; 3 — 95%

солей  $C_I < 0,5$  г/л; II класс – можно использовать для большинства культур и типов почв при условии хорошей дренированности,  $0,5 < C_{II} < 1$  г/л; III класс – применяют на легких почвах при обеспеченной дренированности с ежегодными профилактическими промывками при использовании солеустойчивых культур,  $1 < C_{III} < 2,5$  г/л; IV класс – имеют ограниченное использование при разбавлении и улучшении их качества,  $2,5 < C_{IV} < 5$  г/л; V класс – использовать для орошения нецелесообразно,  $5$  г/л  $< C_V$ .

Для получения воды хорошего качества ( $C < 1$  г/л) можно прибегнуть к разбавлению минерализованных вод пресными.

При разбавлении минерализованных вод до концентрации  $C_{II} = 1$  г/л требуемая кратность разбавления зависит от исходной концентрации минерализованных вод и составляет для вод с концентрацией, г/л: 2 – 2...3 раза, 5 – 6...8 раз, 7 – 10...11 раз.

**Использование для орошения подземных, сточных, коллекторных и морских вод.** В связи со значительным ростом водопотребления и ограниченностью ресурсов поверхностных вод во всем мире более интенсивно стали использовать для орошения в первую очередь подземные воды.

Существенно может повысить комплексность использования водных ресурсов орошение сточными водами. При этом для полива можно использовать воду, содержащую органические соединения, сократить объем сбрасываемых в водные источники загрязненных сточных вод и уменьшить количество свежей воды, забираемой для орошения. Сточные воды изменяют природные свойства почв, но при правильном орошении умеренными дозами обеспечивают устойчивое повышение их плодородия. Под ЗПО обычно отводят малоплодородные, требующие мелиорации земли, с хорошей естественной дренированностью, так как круглогодичное орошение сточными водами вызывает подъем грунтовых вод. Количество сточных вод, используемое за сезон, зависит от вида сельскохозяйственной культуры и географического положения ЗПО. В центральных районах ЕТС оросительные нормы колеблются от 3 до 4 тыс. м<sup>3</sup>/га. В перспективе предполагается расширение площадей, орошаемых сточными водами.

С развитием орошения увеличивается объем коллекторно-дренажных вод. Состав их зависит от степени и характера засоления почв, подпочвенных пород и грунтовых вод, а также режима орошения. Минерализация этих вод составляет 0,5...20 г/л. В вегетационный период минерализация коллекторно-дренажных вод обычно минимальна, так как происходит разбавление их оросительной водой. В многолетнем периоде наблюдается тенденция к снижению минерализации. Вода с концентрацией солей более 5...6 г/л обычно непригодна для орошения, а при 3...4 г/л пригодна для проведения промывок и вегетационных поливов.

Изучают возможности орошения морскими водами. Опыты показывают, что при достаточной дренированности не происходит накопления

солей в почвенном слое. Сбалансированность ионного состава морской воды позволяет растениям непосредственно использовать ее.

**Повышение эффективности использования воды и экономия водных ресурсов в орошении.** С развитием орошаемого земледелия для увеличения продуктов питания особое значение приобретают рациональное использование водных ресурсов и совершенствование оросительных систем и методов орошения. Следует отметить что существенное значение в экономии воды в орошении имеет *улучшение конструкции и эксплуатации оросительных систем*. Около половины орошаемых площадей мира требуют коренной реконструкции для повышения водообеспеченности орошаемых земель и рационального использования воды, т. е. существенного снижения потерь воды во всех звеньях оросительной сети и исключения засоления и заболачивания.

Следующим по значению мероприятием после реконструкции является *совершенствование методов распределения воды*. Отмечено, что при точном регулировании режима орошения оросительные нормы можно снизить в 2 раза при снижении урожая не более чем на 10...20 %.

*Совершенствование техники полива и использование новых способов орошения*, таких, как капельное и аэрозольное, также способствуют экономии воды. Однако эти методы не заменяют обычного регулярного орошения и экономят 15...20 % воды при сочетании с обычными способами орошения.

*Уменьшение потерь на испарение и фильтрацию из водохранилищ и каналов* существенно экономит водные ресурсы при орошении.

Значительные сокращения оросительной воды на единицу продукции могут быть получены при комплексных мелиорациях (коренное улучшение всех жизненно важных для растения факторов внешней среды инженерными методами). В техническом отношении это комплекс мероприятий, позволяющих существенно увеличивать продуктивность растений направленным воздействием на среду, сведя до минимума разность между требованиями растений и условиями внешней среды. Если обычные гидромелиорации направлены только на водный режим и непосредственно влияют на тепловой и питательный (далекó не всегда оптимальным образом), то при комплексных мелиорациях целенаправленно управляют питательным и в ряде случаев тепловым режимами. При комплексном управлении факторами жизни растений продуктивность их повышается в 2...4 раза. При этом водопотребление несколько снижается и, таким образом, затраты воды на единицу продукции уменьшатся.

Наиболее существенный фактор регулирования при комплексных мелиорациях – регулирование питательного режима.

За последние годы в орошаемом земледелии все более широко применяют прогрессивный способ внесения минеральных удобрений с поливной водой (фертигация). Этот способ позволяет механизировать и автоматизировать снабжение растений питательными элементами и

способствует получению более высоких урожаев сельскохозяйственных культур, особенно на почвах легкого механического состава.

Наиболее приспособлена для внесения удобрений с оросительной водой широкозахватная поливная техника: машины "Фрегат", "Волжанка", "Днепр", оборудованные техническими средствами для дозированной подачи минеральных удобрений с поливной водой – гидрородкормщиками.

Для удобрительного полива наибольшее применение получили водорастворимые минеральные удобрения: мочевины, аммиачная селитра, хлористый калий, аммофос.

Использование более совершенной широкозахватной дождевальной техники для внесения минеральных удобрений с поливной водой при учете природных и агрохимических особенностей орошаемых территорий, правильном проектировании, строительстве и эксплуатации оросительных систем способствует устранению опасности загрязнения окружающей среды (почвы, грунтовых и поверхностных вод). При правильном орошении коэффициенты возврата могут быть уменьшены с 0,5 до 0,1. Опасность загрязнения окружающей среды сводится в основном к вымыванию, т. е. потерям основных питательных веществ, в частности нитратов, в грунтовые воды или за пределы корнеобитаемого слоя почвы, а также к смыву их с орошаемой территории в близлежащие водоемы.

Потери нитратов не исключены даже при правильной организации орошения, особенно на почвах легкого механического состава. Эти потери увеличиваются еще больше во влажные периоды года под влиянием атмосферных осадков.

Поэтому при внесении минеральных удобрений с поливной водой необходимо проведение определенного комплекса мероприятий по охране окружающей среды от загрязнения:

- установление и применение оптимальных доз вносимых удобрений, поливных режимов и их рационального соотношения;

- соблюдение дробной (на протяжении всего вегетационного периода) технологии внесения удобрений;

- удобрительные поливы в фазы наибольшего выноса растениями питательных веществ;

- обязательная корректировка доз азотных удобрений в засушливые и влажные периоды года;

- учет рельефа и уклона орошаемых участков в соответствии с агротребованиями для применяемой дождевальной техники, а также глубины залегания грунтовых вод. Полив с одновременным внесением удобрений можно применять на участках с глубиной залегания грунтовых вод не менее 1 м от поверхности на глинистых и суглинистых почвах и не менее 1,5 м на песчаных;

- удобрительные поливы лучше проводить рано утром, вечером или ночью для уменьшения влияния ветра и повышения равномерности распределения удобрений на орошаемой территории;



существенное значение для равномерности распределения удобрений имеют величина и постоянство гидравлического давления в дождевальной системе.

Следовательно, водозабор на орошение можно уменьшить на 25...30 %, т. е. ежегодно сэкономить 30...45 км<sup>3</sup> воды или оросить дополнительные площади. Модернизация магистральных и межхозяйственных каналов, противофильтрационные мероприятия, применение ЭВМ для управления процессом водораспределения и составления графика поливов, автоматизация работы затворов и задвижек способствуют уменьшению забора воды примерно на 10 %. Улучшение внутриводоемного использования воды, более тесная увязка графика полива с потребностями растений, предотвращение избыточного орошения, совершенствование систем поверхностного и капельного орошения, комплексная мелиорация позволяют сократить водозабор еще на 20...40 %.

### 9.3. Сушительные мелиорации

#### Особенности осушительных мелиораций как участника ВХК.

В среднем по стране каждый осушаемый гектар дает продукции в 1,5 раза больше, чем немелиорированный (орошаемый в 5,8 раза больше). Учитывая наступление периода с более влажным климатом на севере ЕТС, можно предполагать, что необходимость осушения в этих районах не уменьшится.

Особый упор сейчас делают на повышение эффективности использования осушаемых земель и сокращение сроков получения на этих землях проектной урожайности. Это может быть достигнуто регулированием водного и питательного режимов. Однако развитие двустороннего регулирования сдерживается из-за ограниченности водных ресурсов в центральных районах ЕТС. Поэтому рациональное расходование воды необходимо даже в тех зонах, где за вегетацию сумма осадков превышает испарение.

Одним из способов, реализующих рациональное использование водных ресурсов, в осушении является создание польдерных осушительных систем в поймах рек, которые позволяют рационально использовать как поверхностные, так и грунтовые воды.

В то же время развитие агро-мелиоративной обработки осушенных полей, в том числе глубокое рыхление с окультуриванием подпочвенного слоя и кротованием, а также все большее внесение удобрений на осушаемых землях, тем более в условиях дождевания, приводят к интенсификации выноса питательных веществ и загрязнению рек-водоприемников.

Поэтому осушительные мелиорации как участника ВХК можно рассматривать в нескольких аспектах.

*Первый* – при осушении происходит сработка "вековых" запасов грунтовых вод и на некоторое время (до 7 лет) сток рек-водоприемников увеличивается. Расходы летней межени возрастают в 1,5...2 раза.

В то же время несколько уменьшается максимальный сток из-за создания в зоне аэрации некоторой емкости, способной вместить осадки и талые воды. Однако эти водные ресурсы не следует считать потерянными, так как они идут на транспирацию и участвуют в создании сельскохозяйственной продукции.

Таким образом, осушение, трансформируя режим стока, влияет определенным образом на водные ресурсы.

*Второй* – в зоне неустойчивого увлажнения осушаемые земли необходимо в засушливые периоды увлажнять с помощью подъема грунтовых вод или орошения дождеванием. Это переводит осушительные системы в категорию осушительно-увлажнительных или осушительно-оросительных и делает их в составе ВХК водопотребителями.

*Третий* – интенсивные способы земледелия, глубокое рыхление, кротование, а также значительные дозы внесения минеральных удобрений (более 100 кг/га д. в. азота) превращают осушительные системы в источник загрязнения рек-водоприемников, так как водоотведение может составить 30...50 % водоподачи (осадки + оросительные нормы).

*Четвертый* – осушение земель с грунтовым типом водного питания снижает уровень грунтовых вод не только на осушаемой территории, но и на прилегающих землях. Таким образом, осушение влияет на экологию сопряженных биогеоценозов.

**Рациональное использование водных ресурсов при осушении.** Для комплексного решения водохозяйственных проблем при осушительных мелиорациях необходимо:

создавать системы, позволяющие регулировать сток с осушаемых территорий. Для этого осушительные каналы и дрены должны иметь устройства, прекращающие сброс дренажных вод в засушливые периоды вегетации. В ряде случаев осушительная сеть может способствовать ускорению подачи воды в почву;

более эффективно использовать местные водные ресурсы за счет создания водохранилищ и прудов, собирающих дренажный и поверхностный сток для увлажнения, водоснабжения, рыбоводства, здравоохранения и отдыха;

осмотрительно проводить при мелиорации пойменных земель регулирование водоприемников, учитывая, что возможны переосушение территории и уменьшение общей водности речного бассейна. Шире применять польдерное осушение, включающее систему защитных дамб, каналов, дрен и насосных станций, предназначенных для откачки воды с обвалованной территории. Точное регулирование уровня грунтовых вод на таких системах предотвращает переосушение и способствует увеличению водности речного бассейна;

создавать мелиоративные системы комплексного регулирования водного, питательного и теплового режимов, позволяющие в 1,5... 2 раза увеличить продуктивность осушаемых земель и повысить эффективность использования оросительной воды;

осуществлять оборотное использование дренажного стока для

орошения осушаемых земель и в целях предотвращения загрязнения окружающей среды;

снижать отрицательное влияние осушительных систем на прилегающие территории;

использовать водохранилища и озера на осушаемых землях для рыбоводства.

**Водооборотные системы в осушении и использование дренажного стока для орошения.** Дренажный сток с осушаемых территорий колеблется в широких пределах. Для северо-запада Нечерноземной зоны России при колебаниях осадков в безморозный период от 370 до 570 мм (в 1,5 раза) изменения дренажного стока составляют 70...250 мм (в 3,6 раза). При этом больше половины дренажного стока приходится на осенний период, остальная часть – на весну и лето.

Интенсивность нисходящих водных потоков, концентрация дренажного стока и вынос с ним питательных веществ зависят от многих факторов. Количество отводимой воды определяется водоподачей и интенсивностью испарения. Концентрация дренажного стока непосредственно связана с минералогическим и механическим составом почвы, степенью ее окультуренности, характером и интенсивностью процессов аккумуляции (минерализации) питательных веществ, количеством и составом поступающих органических и минеральных удобрений и растительных остатков, интенсивностью обработки почвы, составом возделываемых культур и т. д.

Количество отводимой воды и концентрация в ней солей определяют вынос вещества с единицы площади.

Дренажный сток является почвенным раствором, который формируется при взаимодействии поступающей воды с твердой фазой почвы и вносимыми удобрениями. На дренируемых почвах выделяют три случая формирования дренажного стока, которые определяют его принципиально различный качественный состав:

дренажный сток при осушении земель без орошения (при этом количество и состав стока формируются атмосферными осадками, грунтово-напорными водами и путем их взаимодействия с почвой и удобрениями);

дренажный сток при двустороннем регулировании водного режима – осушение и орошение неминерализованной водой (количество и состав стока зависят от осадков, интенсивности грунтово-напорного питания, поступающей в почву оросительной воды и влагозапасов почвы);

дренажный сток на дренируемых почвах с использованием на орошение стоков животноводческих комплексов, коммунального хозяйства и промышленности (объем и состав дренажного стока зависят не только от количества атмосферных осадков и грунтового подпитывания, но и от оросительной нормы и качественного состава стоков).

Вынос веществ с дренажным стоком начинается в первый же год

строительства дренажа независимо от поступления их в почву. В этом случае дренажный сток слабо концентрирован, так как выносятся только свободные, незакрепленные ионы почвы. При внесении удобрений концентрация дренажного стока повышается и уже в первый год составляет значительную величину. Так, при внесении на 1 га 40 т навоза, 0,4 т суперфосфата и 0,4 т калийной соли из профиля слабо-окультуренной глееватой почвы с 1 га вымывалось, кг: кальция – 26,4, магния – 20,3, азота – 7,1, калия – 4, органических веществ – 140.

Вынос водорастворимых веществ из почвы пропорционален дренажному стоку, а последний зависит от количества воды, поступающей в почву с атмосферными осадками и оросительной водой. Суммарный же вынос солей с 1 га прямо пропорционален дренажному стоку (величине и концентрации).

Величина дренажного стока и вынос с ним определяются не столько степенью осушения территории и удобренности почвы, сколько характером ее использования. Как сток, так и суммарный вынос солей больше на поле, где возделывают пропашные культуры, и меньше под травами.

Многолетние травы обеспечивают большее водопотребление и использование элементов питания, содержащихся в почве, а следовательно, меньшая их часть вымывается с дренажным стоком. Так, при одинаковой степени осушения дренажный сток под многолетними травами в 5 раз, а вынос солей с ним в 13 раз ниже, чем под морковью. Причем на посевах моркови больше солей выносятся осенью, а под многолетними травами – весной. Следовательно, формирование дренажного стока, его динамика по величине и концентрации солей в существенной степени определяются хозяйственной деятельностью человека.

Дренажные воды, как правило, слабокислые, гидро-карбонатно-кальциевого состава. Это обусловлено непрочным закреплением в почве кальция и высокой его миграционной способностью. Из биогенных элементов кроме кальция и магния больше всего в дренажные воды поступает нитратного азота, значительно меньше фосфора и калия.

Кроме минеральных удобрений с дренажным стоком из почвы выносятся известковые материалы, ингибиторы, гербициды и другие химические вещества, которые загрязняют грунтовые воды.

На долю химизации приходится более 60 % возрастания минерализации почвенно-грунтовых вод. Расчеты показывают, что увеличение осушаемых земель на 1 % повышает среднюю годовую минерализацию речных вод на 13,6 мг/л. При наличии в речном бассейне до 50 % сельскохозяйственных осушаемых угодий и внесении химвелиорантов до 1 т/га общая минерализация возрастает в 1,5...2 раза, в том числе содержание кальция – в 3,5, хлора – в 3...4 раза. Все эти вещества могут быть использованы для сельскохозяйственных культур.

Таким образом, осушительные мелиорации как участник ВХК

вливают на величину стока рек, на загрязнение вод рек-водоприемников, на изменение водного режима окружающей территории и выступают в качестве водопотребителя при орошении осушаемых земель.

В целях снижения отрицательного воздействия осушения на окружающую среду его оптимальные нормы должны не только учитывать создание оптимума для сельскохозяйственных растений, но и быть оптимальными с точки зрения влияния на сток и вымыв питательных веществ. Оптимальный же режим управления грунтовыми водами и создание водооборотных осушительно-увлажнительных систем позволяют не только экономить водные ресурсы, но и предотвращать загрязнение рек-водоприемников.

#### 9.4. Энергетика

Нет ни одной отрасли хозяйства, где бы обходились без электрической энергии, которая является основным движущим фактором развития всех отраслей промышленности, транспорта, коммунального и сельского хозяйства. Электроэнергия имеет большое значение в ускорении технического прогресса, оказывает влияние на размещение производительных сил и больше, чем какая-либо другая отрасль народного хозяйства, определяет уровень экономического развития и национального дохода общества.

Современные электрические станции разделяют на использующие невозобновляемые источники энергии и работающие на возобновляемых источниках энергии.

К первой группе относятся тепловые электростанции (ТЭС), в которых электрическую энергию получают за счет сжигания органического топлива (уголь, нефть, газ, торф и др.). В эту же группу входят и атомные электростанции (АЭС), которые используют ядерное топливо (уран-235, уран-233, плутоний-239).

Во вторую группу входят гидроэлектростанции (ГЭС), работающие на энергии естественных водотоков, приливные электростанции (ПЭС), использующие энергию приливов, ветроэлектростанции, работающие на энергии ветра, геотермальные установки, установки, использующие энергию солнечного излучения, и многие другие. Из станций второй группы практическое значение пока имеют только ГЭС. Особым видом ГЭС являются гидроаккумулирующие электростанции (ГАЭС), предназначенные для выравнивания нагрузки тепловых электростанций (ТЭС) и АЭС.

ГЭС как источник электрической энергии имеют существенные преимущества перед тепловыми и атомными электростанциями. Они, используя возобновляемую энергию, не истощают топливные ресурсы Земли, требуют меньшего числа эксплуатационного персонала (в 4 раза меньше, чем на ТЭС, и в 6 раз меньше, чем на АЭС). Энергия, вырабатываемая ГЭС, имеет низкую себестоимость.

Высокая маневренность ГЭС делает их незаменимыми компонен-

тами энергосистем. Беря на себя неравномерную часть нагрузки, энергосистемы, гидроэлектростанции создают условия более равномерной работы тепловых и атомных электростаций, чем повышают их надежность и экономичность, улучшают показатели всей энергосистемы. Маневренность ГЭС позволяет использовать их в качестве резерва энергосистемы.

В большинстве случаев гидротехнические сооружения ГЭС являются комплексными.

#### ***9.4.1. ГЭС и комплексное использование водных ресурсов***

Россия занимает одно из ведущих мест в мировой гидроэнергетике. В процессе своего развития гидроэнергетика России прошла несколько этапов.

В предвоенные годы сооружались в основном отдельные гидроузлы на водотоках, где имелись наиболее благоприятные топографические и геологические условия, причем выбирали створы, наиболее близко расположенные к местам потребления нагрузки, что ограничивало длину линий электропередачи.

Гидроэнергетическое строительство в первые два послевоенных десятилетия было в основном направлено на восстановление ГЭС, которые были разрушены во время войны. Одновременно строили новые ГЭС. Крупным этапом в развитии отечественной гидроэнергетики явилось ориентирование гидроэнергетического строительства на каскадное для наиболее полного использования водных ресурсов рек, улучшения технико-экономических показателей ГЭС и их эксплуатационных характеристик, создания условий по ускорению транспортной реконструкции водных путей, расширения орошаемых площадей, решения водохозяйственных задач.

Однако на этом этапе водохранилища ГЭС еще не в полной мере используются всеми отраслями водного хозяйства, степень регулирования стока определяется в основном требованиями энергоснабжения, и капиталовложения в строительство комплексных гидроузлов практически полностью относятся на энергетику. Лишь в последние 15...20 лет, когда во многих районах страны сильно возросло потребление воды, особенно в южной зоне в связи с широким развитием орошаемого земледелия, использование водных ресурсов становится многоотраслевым. В целях повышения водообеспеченности этих районов в этот период начинают строительство комплексных гидроузлов: Краснодарского и Чиркейского на Северном Кавказе и др. При этом создаются условия для более широкого развития гидроэнергетики, так как становится возможным отнесение части затрат на других участников ВХК.

С ростом водопотребления возрастают требования к регулированию речного стока. Обостряются противоречия между отдельными

участниками ВХК, например водного транспорта и рыбного хозяйства – обеспечение необходимых судоходных и рыбсхозхозяйственных попусков. Увеличение сброса в речную сеть сточных вод промышленных объектов и городов, рост объемов сильно минерализованных возвратных вод с орошаемых массивов потребуют значительного увеличения расходов в реках в период летней и особенно зимней межени для поддержания необходимых санитарно-гигиенических условий. Определенные требования к гидрологическому режиму рек выдвигаются также в связи с решением экологических проблем внутренних морей и крупных озер.

Таким образом, в использовании водных ресурсов наступает этап, особенностью которого является глубокое регулирование стока главным образом в интересах неэнергетических водопотребителей и водопользователей. Это, с одной стороны, ограничивает использование, а с другой – открывает новые дополнительные возможности для гидроэнергетического строительства. Начинается развитие гидроэнергетики в связи с комплексным водохозяйственным строительством. Гидроэнергетика выступает здесь как сопутствующий компонент ВХК, интересы которого сочетаются, а иногда и полностью подчиняются режиму, удовлетворяющему требования других участников комплекса. Примером таких гидроузлов являются Крапивинский на Томи, Капчагайский на Или, Зейский на Зее и др. Например, на реках Дальнего Востока – Зее, Буреи и др. с большими ливневыми паводками – совместно решают две главные проблемы: борьбы с наводнениями и энергетического использования рек. Так, Зейский гидроузел снизил ущерб от наводнений Верхнего Амура в 3 раза.

Использование водных ресурсов должно отвечать определенным требованиям: экономичности, отсутствию отрицательного воздействия комплекса на окружающую среду, простой и надежной эксплуатации.

Дальнейшее развитие гидроэнергетики связано с освоением природных ресурсов Сибири и восточных районов России и созданием крупных территориально-производственных комплексов (ТПК).

Наиболее полно народнохозяйственное значение гидроэлектростанций проявляется в создании на базе ГЭС крупных энергопромышленных комплексов – формы объединения предприятий, возникающих благодаря одному или нескольким крупным гидроэнергостроителям. Строительство энергопромышленных комплексов на базе ГЭС обеспечивает наиболее рациональное освоение районов, использование их природных ресурсов. Созданы мощные ТПК – Братско-Усть-Илимский, Красноярский, Саянский и др.

В перспективе возможно дальнейшее повышение эффективности производства электроэнергии в результате сооружения энергокомплексов, объединяющих ТЭС, АЭС, ГЭС и ГАЭС, связанных и территориально, и единым технологическим процессом.

Для районов изолированного энергоснабжения, таких, как Камчатская, Магаданская, Архангельская области и др., где энергоснаб-

жение обеспечивается дизельными электростанциями, расходующими дорогостоящее и дефицитное жидкое минеральное топливо, важное значение в современных условиях имеет строительство малых ГЭС.

В первую очередь малые ГЭС будут строить в составе уже действующих и строящихся гидроузлов для утилизации энергии сбрасываемой воды, а также в труднодоступных районах, лишенных источников воды. Для новых малых ГЭС создадут современное оборудование, способное работать в автоматическом режиме. Например, в европейской части России имеется более 1 тыс. водохранилищ ирригационного, теплоэнергетического, рыбохозяйственного, коммунального, транспортного назначения. При сооружении малых ГЭС проще согласовывать противоречащие друг другу требования водопользователей.

Развитию малой энергетики способствуют ее надежность и простота в эксплуатации, возобновляемость ресурсов, положительное влияние на окружающую среду (увеличение водности малых рек), оживление их ихтиофауны и прибрежной растительности, рекреационное использование водохранилищ и т. д.

Наконец, полная автоматизация и телемеханизация гидроэлектростанций создают хорошие условия труда для обслуживающего персонала, исключают вредные выбросы в атмосферу.

Однако создание водохранилищ для ГЭС приводит к затоплению плодородных земель в поймах рек, вызывает подтопление окружающих территорий, размыв берегов, нарушение условий миграции рыб в водотоках.

#### 9.4.2. Гидроэнергетические ресурсы

Доля гидроэнергии в общих энергетических ресурсах Земли невелика. Однако ее ежегодная возобновляемость неограничена.

Гидроэнергетические ресурсы делят на валовые, технические и экономические.

Под *валовым гидроэнергетическим потенциалом* понимают суммарную теоретическую энергию речного стока.

Цикличность воспроизводства энергии рек полностью зависит от речного стока, гидроэнергетические ресурсы неравномерно распределяются внутри года, и величина их меняется из года в год. В обобщенном виде гидроэнергетические ресурсы характеризуются среднегодовой величиной. На величину и распределение гидроэнергетического потенциала в значительной степени влияют кроме водных ресурсов рельеф территории и разность отметок между средней высотой данной территории и местным базисом эрозии, что характеризуется валовым гидроэнергетическим потенциалом крупных, средних и малых рек, отнесенных к 1 км<sup>3</sup> поверхностного стока данной территории.

Часть гидроэнергетических ресурсов рек, которую можно использовать, создавая современные гидроэлектростанции, составляет так называемый *технический гидроэнергетический потенциал рек*. Эту часть гидроэнергоресурсов можно определить, исключив потери.



Технический потенциал – величина постоянная, и влияет на нее лишь способ производства электрической энергии на гидроэлектростанциях.

Суммарные потери при освоении гидроэнергетического потенциала в целом для страны оценивают в 36 %.

*Экономический гидроэнергетический потенциал* – это та часть гидроэнергетических ресурсов, которая может быть реализована путем выработки электроэнергии на ГЭС, целесообразность строительства которых обоснована проектами как экономически эффективное мероприятие. Его определяют сопоставлением экономических показателей ГЭС и других возможных источников получения электроэнергии в рассматриваемом районе (ТЭС, АЭС).

Экономический гидроэнергетический потенциал – величина переменная, зависящая от многих изменяющихся во времени факторов: изученности рек, технического прогресса в теплоэнергетике и особенностей обеспеченности рассматриваемого региона энергетическим топливом, его качества и стоимости.

Преобладающая часть гидроресурсов сосредоточена главным образом в бассейнах рек Енисея и Лены (валовой потенциал оценивается в 1175 млрд кВт·ч, а технический – 887 млрд кВт·ч).

### 9.4.3. Использование водной энергии

Для того чтобы рассчитать объем водных ресурсов, необходимый для выработки энергии, нужно разобраться в основных принципах получения гидравлической энергии.

Гидравлическая энергия рек представляет собой работу, которую совершает текущая в них вода. Спускаясь с возвышенных участков на более низкие в виде больших и малых водотоков, эти постоянно возобновляемые природой массы воды теряют энергию, которую можно эффективно использовать. В естественных условиях эта энергия преобразуется в механическую, расходуемую на размыв грунта, сглаживание рельефа суши, перенос продуктов размыва, а также на преодоление сил сопротивления движению воды в реке.

Для определения энергии водного потока рассмотрим его участок АК длиной  $L$  (рис. 16). При постоянном поперечном сечении водотока  $w$  объем воды на этом участке будет  $wL$ , а ее масса  $m = \rho wL$  ( $\rho$  – плотность воды).

Работа (Дж), совершаемая потоком воды под действием гравитационных сил,

$$J_{\text{уч}} = FL = mg \sin \alpha L = \rho w g L \sin \alpha L, \quad (25)$$

где  $g$  – ускорение свободного падения,  $\text{м/с}^2$ .

Длину участка  $L$  (м) можно выразить как произведение скорости потока  $v$  на время  $\tau$ , т. е.  $L = v \tau$ , тогда

Рис. 16. Схема для определения работы речного потока

$$J_{\text{yч}} = \rho g w \cup \tau L \sin \alpha. \quad (26)$$

Принимая во внимание, что  $w \cup = Q$  — расход воды в реке, в  $L \sin \alpha = H_{\text{yч}}$  — падение реки на участке АК, и подставляя эти выражения в формулу (26), получим

$$J_{\text{yч}} = \rho g Q H_{\text{yч}} \tau. \quad (27)$$

Мощность, т. е. работа в единицу времени,

$$N_{\text{yч}} = J_{\text{yч}} / \tau = \rho g Q H_{\text{yч}}. \quad (28)$$

Подставляя в выражение (28)  $\rho = 1000 \text{ кг/м}^3$  и выражая  $Q$  в  $\text{м}^3/\text{с}$ , а  $H_{\text{yч}}$  в м, получим мощность в кВт:

$$N_{\text{yч}} = 9,81 Q H_{\text{yч}}. \quad (29)$$

Энергию реки, т. е. работу в течение  $\tau$  ч, выраженную в кВт·ч, определим по формуле

$$\mathcal{E}_{\text{yч}} = N_{\text{yч}} \tau. \quad (30)$$

Так как  $Q \tau = 3600 W$ , где  $W$  — объем воды (сток),  $\text{м}^3$ , протекающий за  $\tau = 3600$  с, то формулу (30) можно записать в виде

$$\mathcal{E}_{\text{yч}} = 9,81 Q H_{\text{yч}} \tau / 3600 = W H_{\text{yч}} / 367,2. \quad (31)$$

Формулы (29) и (31) выражают потенциальную мощность и выработку электроэнергии.

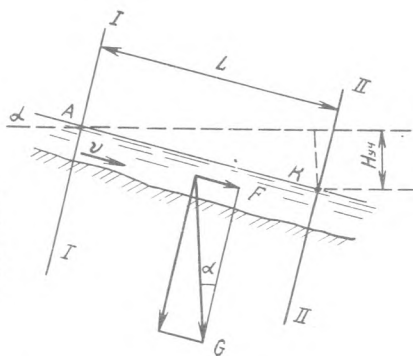
Объем воды, необходимой для выработки заданного количества энергии, можно рассчитать по формуле:

$$W = 367,2 \mathcal{E} / H.$$

Обычно падение уровня водотока  $H_{\text{yч}}$  более или менее равномерно распределено по его длине. Наиболее эффективное использование энергии водотока возможно при сосредоточении перепадов воды на относительно коротком участке. Поэтому прибегают к искусственному увеличению перепада (созданию напора).

Возможны три основные схемы создания сосредоточенного напора: плотинная, деривационная, комбинированная.

Плотинную схему (рис. 17, а, б) применяют преимущественно при больших расходах воды в реке и малых уклонах ее свободной поверхности. Посредством плотины, построенной в пункте К, создают подпор воды, который распространяется вверх по реке до пункта А. Образую-



щееся при этом водохранилище может служить регулирующей емкостью, в которой периодически накапливаются запасы, при этом более полно расходуется энергия водотока. Наличие кривой подпора исключает использование некоторой части напора рассматриваемого участка реки  $h_{\text{подп.кр}}$ , который при данной схеме его концентрации (без учета потерь) составляет  $H = H_{\text{уч}} - h_{\text{подп.кр}}$ .

Гидроэлектростанции, сооруженные по плотинной схеме, делят на русловые и приплотинные.

Основными сооружениями ГЭС, выполненными по плотинной схеме, являются плотины и здания ГЭС. Русловой называют такую ГЭС, у которой напор создают и здание, и плотина (см. рис. 17, а).

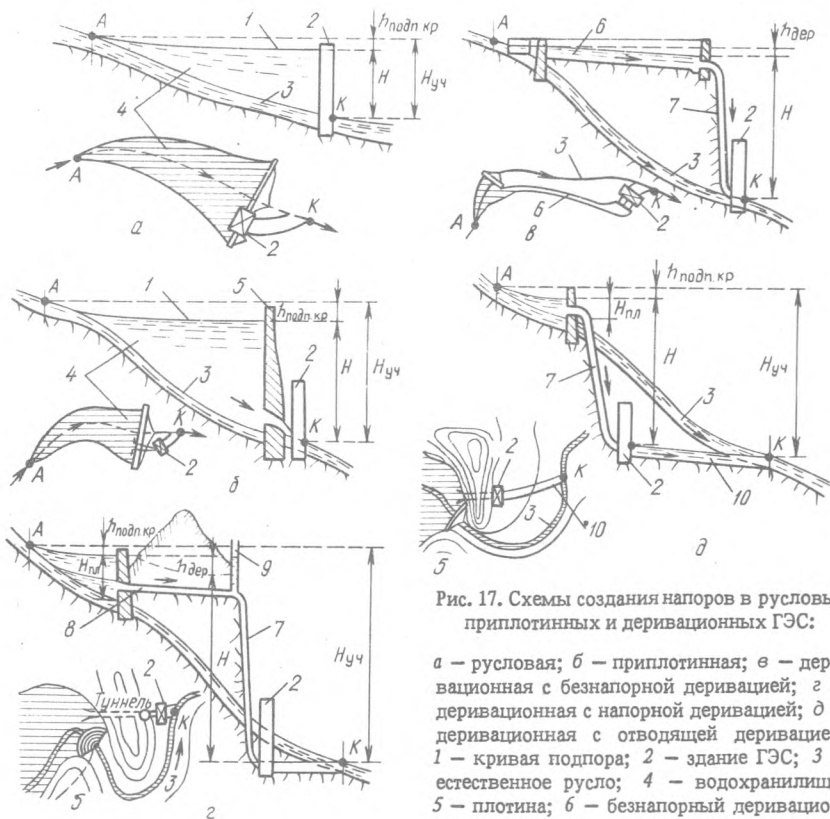


Рис. 17. Схемы создания напоров в русловых приплотинных и деривационных ГЭС:

а — русловая; б — приплотинная; в — деривационная с безнапорной деривацией; г — деривационная с напорной деривацией; д — деривационная с отводящей деривацией; 1 — кривая подпора; 2 — здание ГЭС; 3 — естественное русло; 4 — водохранилище; 5 — плотина; 6 — безнапорный деривационный водовод; 7 — турбинный трубопровод;

8 — напорный деривационный водовод; 9 — уравнильный резервуар; 10 — отводящий деривационный водовод;  $H_{\text{уч}}$  — падение реки на участке АК;  $H_{\text{пл}}$  — то же от точки А до плотины с учетом потерь напора в реке  $h_{\text{подп.кр}}$ ;  $h_{\text{дер}}$  — потери напора в деривации;  $H$  — сосредоточенный напор при данной схеме

Здание русловой ГЭС воспринимает полное давление воды со стороны верхнего бьефа и должно быть устойчивым, как и плотина. Строят русловые ГЭС главным образом на равнинных реках при напорах 30...40 м, когда для увеличения статической устойчивости здания ГЭС не требуется проведения дорогостоящих мероприятий.

При более высоких напорах (30...300 м) здание ГЭС не может входить в состав напорного фронта. Его располагают за плотиной, т. е. со стороны ее низового откоса (см. рис. 17, б). Такие ГЭС называются приплотинными. Для подачи воды к турбинам в этом случае требуются водоприемники и турбинные трубопроводы.

*Деривационные схемы* (рис. 17, в, г, д) применяют при гидроэнергетическом использовании горных и предгорных рек с относительно большими уклонами и малыми расходами воды. При такой схеме в верхней части используемого участка реки строят небольшую плотину. При этом образуется водохранилище и создается подпор, что обеспечивает отвод воды из реки в деривацию (искусственный водовод), гидравлический уклон которого значительно меньше уклона реки. Благодаря различным уклонам в конце рассматриваемого участка (точка К на рис. 17, в, г) устанавливаются разные уровни воды в реке и деривации. К сооружениям деривационных ГЭС относятся головной узел, деривация и станционный узел.

В головном узле осуществляют регулирование расходов воды и бесперебойную подачу ее в деривацию, сброс излишков, превышающих потребности в воде энергетики и мелиорации, очистку воды от внутриводного льда, наносов и мусора.

Головной узел состоит из плотины с водосбросом и водоприемника, а если необходимо, то в нем дополнительно размещают отстойник (при большом количестве крупных наносов в реке), грязеспуск, шугосброс (при образовании внутриводного льда) и водоприемник для неэнергетических потребителей воды.

Деривация в зависимости от местных топографических и геологических условий может быть безнапорной (каналы, лотки, акведуки, безнапорные туннели) (см. рис. 17, в) или напорной (трубопроводы, напорные туннели) (см. рис. 17, г). По этим сооружениям подают воду от головного узла к станционному.

Станционный узел ГЭС с безнапорной деривацией состоит из напорного бассейна, который сооружают в конце подводящего безнапорного туннеля и в конце канала, турбинных трубопроводов, здания ГЭС и отводящего канала.

Станционный узел ГЭС с напорной деривацией (см. рис. 17, г) помимо здания станции и турбинных трубопроводов вместо напорного бассейна имеет уравнительный резервуар, который устраивают в конце длинного подводящего напорного туннеля для защиты его от перегрузок избыточным внутренним давлением и для снижения гидравлического удара в турбинных водоводах, возникающего при нестационарных режимах работы ГЭС.

Сосредоточенный перепад уровней воды можно создать также с помощью отводящего деривационного водовода, продольный уклон которого меньше уклона естественного русла (см. рис. 17, д). Здание ГЭС в этом случае располагают в глубокой выемке или под землей на значительном расстоянии от нижнего створа используемого участка реки.

Деривационные ГЭС сооружают, если при небольшой протяженности и малой площади сечения деривационного водовода можно получить напор до 1000 м и более.

В *комбинированной* схеме использованы выгодные свойства двух предыдущих схем, т. е. напор создают за счет устройства плотины. В таких схемах напор, полученный за счет плотины и деривации, соизмерим (см. рис. 17, з).

#### 9.4.4. Каскады ГЭС и водохранилищ

Для повторного использования водных ресурсов создают каскады – это несколько ГЭС, расположенных на одном водотоке в одном бассейне или в разных бассейнах, но связанных единым водным режимом.

При комплексном использовании водных ресурсов отдельные ступени каскада могут быть связаны между собой гидрологически, гидравлически, водохозяйственно и электрически.

Каскадные схемы на равнинных реках состоят главным образом из плотинных ГЭС, а на горных – из деривационных ГЭС.

В каскаде полнее используются энергетические ресурсы реки, повышается степень регулирования стока, т. е. перераспределения стока во времени, что позволяет увеличить не только кратность использования водных ресурсов, но и мощность, и выработку гидроэлектростанций. При этом повышается возможность маневрирования мощностью отдельных ГЭС из-за устранения ограничений по режиму уровней в нижних бьефах; кроме того, меньшая концентрация напора на каждой станции уменьшает затопления. На реках бывшего СССР действовало более 30 каскадов ГЭС суммарной мощностью около 150 тыс. МВт. Примером каскада гидроэлектростанций и водохранилищ является каскад на Днепре, состоящий из шести гидроузлов суммарной мощностью около 3,8 тыс. МВт. Создание водохранилищ на Днепровском каскаде общей вместимостью 44 км<sup>3</sup> позволило осуществить годовичное регулирование стока Днепра и полностью использовать его для народного хозяйства.

Один из самых крупных каскадов – Волжско-Камский суммарной мощностью девяти действующих ГЭС около 9 тыс. МВт.

#### 9.4.5. Потребители электрической энергии и энергетические системы

Гидроэлектростанции, как правило, работают совместно с другими электростанциями – тепловыми, атомными, гидроаккумулирующими, приливными – и обеспечивают электроэнергией заданный район энергоснабжения.

*Электроз энергетической системой* называют совокупность станций, подстанций и потребителей электроэнергии, связанных между собой высоковольтными линиями передачи и электрическими сетями при общем централизованном оперативном управлении.

При объединении электрических станций (ОЭС) в энергосистему значительно повышаются надежность и бесперебойность снабжения электрической энергией потребителей, повышается качество энергии (постоянство частоты и напряжения), уменьшается установленная мощность электростанций благодаря несовпадению по времени максимальных нагрузок отдельных потребителей энергии, снижается резервная мощность, уменьшается себестоимость энергии.

Сумму мощностей всех потребителей энергосистемы в данный момент времени называют ее нагрузкой, которая характеризуется кривой изменения нагрузки во времени, т. е. *графиком нагрузки*.

В крупных энергосистемах, охватывающих обширные территории, суточный график нагрузки существенно сглаживается за счет смещения поясного времени отдельных районов.

В планировании и управлении режимами энергосистем используют суточные, недельные и годовые графики нагрузки. В зависимости от характера потребителей энергии: постоянные (промышленные предприятия), с сезонно изменяющейся нагрузкой (освещение, транспорт, водоснабжение), сезонные (сельскохозяйственное производство, торфоразработки, машинное орошение) – график нагрузки различен.

Основной режимной характеристикой, определяющей работу энергосистемы, является суточный график нагрузки энергосистемы, включающий всех потребителей электроэнергии в районе энергоснабжения.

*Суточный график нагрузки* (рис. 18, а) очень неравномерный, с двумя пиками – утренним и вечерним, связанными утром с началом работы предприятий, а вечером – с освещением и бытовой нагрузкой, и имеет максимальную  $N_{\max}$ , минимальную  $N_{\min}$  и среднесуточную  $N_{\text{ср}}$  мощности.

Коэффициент неравномерности графика нагрузки – амплитуда колебаний мощностей энергосистемы за сутки:

$$\beta = N_{\min} / N_{\max}. \quad (32)$$

На графике суточной нагрузки выделяют три зоны: пиковую – от  $N_{\text{ср}}$  до  $N_{\max}$ , базисную – от  $N_{\min}$  до 0 и полупиковую – между  $N_{\text{ср}}$  и  $N_{\min}$  (см. рис. 18, б).

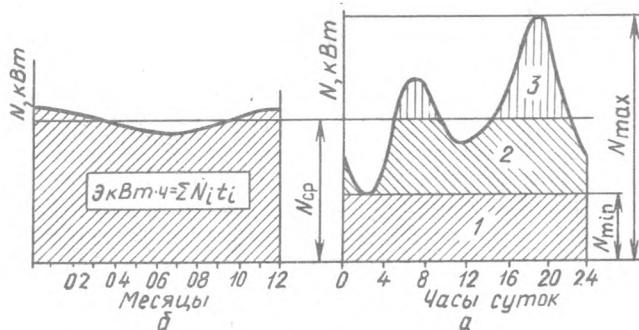


Рис. 18. Графики электрической нагрузки:

а — суточный; б — годовой; 1 — базисная часть графика; 2 — полупиковая; 3 — пиковая

Суточная выработка электроэнергии всеми электростанциями энергосистемы

$$\mathcal{E} = 24 N_{\text{ср}}. \quad (33)$$

Если суточные графики нагрузки разместить в хронологическом порядке друг за другом, то получатся графики, отражающие более длительные периоды (неделя, год).

*Недельный график нагрузки* характеризуется недельными колебаниями нагрузки потребителей, практически одинаковой нагрузкой потребителей системы в рабочие дни недели и резким падением нагрузки в нерабочие дни недели (особенно по воскресеньям).

Годовой график нагрузки имеет относительно небольшую неравномерность (рис. 18, б). Требуемая по графику нагрузки мощность изменяется по сезонам, что связано с влиянием климатических факторов (температуры, продолжительности светового дня и др.). Для промышленных районов максимум нагрузки обычно падает на зимний период, а для сельскохозяйственных с сильно развитым орошением — на лето.

В современных условиях надежное снабжение потребителей электроэнергией возможно лишь при наличии в энергосистеме определенного *резерва мощности*, компенсирующего случайные события, приводящие к ее дефициту: для покрытия случайных пиков нагрузки (нагрузочный резерв)  $N_{\text{н.р}}$ , для замены оборудования, вышедшего из строя (аварийный резерв)  $N_{\text{а.р}}$ , для возможности вывода части оборудования в ремонт (ремонтный резерв)  $N_{\text{р.р}}$  и, наконец, для обеспечения энергией потребителей в случае превышения выпуска продукции или досрочного ввода в эксплуатацию новых объектов промышленного строительства (народнохозяйственный резерв)  $N_{\text{нх.р}}$ .

Суммарный необходимый резерв мощности в энергосистеме составляет

$$\dot{N}_{\text{рез}} = N_{\text{н.р}} + N_{\text{а.р}} + N_{\text{р.р}} + N_{\text{нх.р}} \quad (34)$$

Эффективная форма организации производства электроэнергии и экономии водных ресурсов – сооружение энергокомплексов (ЭК), объединяющих АЭС, ТЭС, ГЭС и ГАЭС (рис. 19), а иногда включающих и крупные насосные станции (НС). Способность электростанций быстро реагировать на изменение нагрузки является важным условием нормальной работы энергосистемы.

Пуск гидроагрегата ГЭС в работу до полного набора мощности занимает 1...2 мин, а с малой нагрузкой – 10...15 с. Такими же высокими маневренными возможностями обладают только ГАЭС.

На тепловых электростанциях маневренные возможности ограничены. Пуск турбогенератора на ТЭС до работы под нагрузкой из холодного состояния занимает 3...6 ч, из горячего – примерно 1 ч. Если при постоянной нагрузке на турбогенераторы для выработки 1 кВт·ч электрической энергии расходуется 330 г условного топлива, то при переменной – 500...600 г. Поэтому при включении в энергосистему ГЭС экономится топливо и, таким образом, косвенно водные ресурсы.

С учетом особенностей режимов работы электростанций высокоманевренные ГЭС и ГАЭС предпочтительно размещать в пиковой и полупиковой частях графика суточной нагрузки энергосистемы, а ТЭС и АЭС – в базисной части графика (см. рис. 18. а). Переменную часть графика нагрузки могут также воспринимать и газотурбинные электростанции (ГТЭС). Однако они работают только на нефти или газе и расходуют до 500 г топлива на 1 кВт·ч.

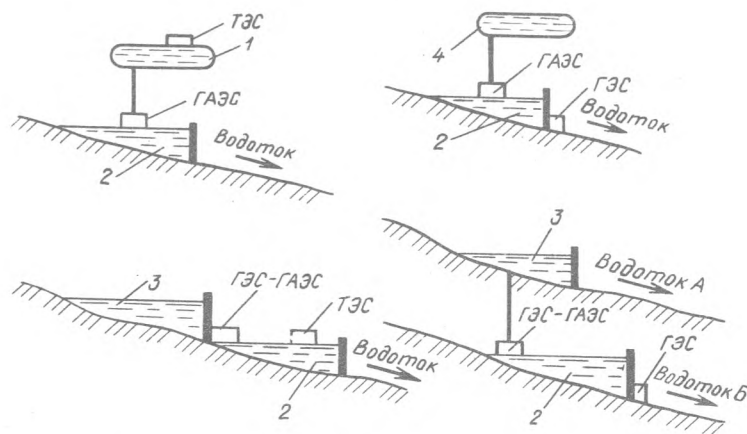


Рис. 19. Схемы энергетических комплексов, включающих ГАЭС:

- 1 – верхний бассейн (пруд-охладитель); 2 – нижний бассейн (водохранилище); 3 – верхний бассейн (водохранилище); 4 – верхний бассейн



В общем виде мощность энергосистемы, кВт · ч,

$$N_{\text{max}}^{\text{ас}} = \sum N_{\text{раб. гар}}^{\text{ГЭС}} + \sum N_{\text{раб. гар}}^{\text{ТЭС}} + \sum N_{\text{раб. гар}}^{\text{АЭС}} \quad (35)$$

где  $N_{\text{раб. гар}}^{\text{ГЭС}}$ ,  $N_{\text{раб. гар}}^{\text{ТЭС}}$ ,  $N_{\text{раб. гар}}^{\text{АЭС}}$  — соответственно рабочие гарантированные мощности гидравлических, тепловых и атомных станций, которые покрывают график нагрузки энергосистемы.

Работу ГЭС в энергосистеме оценивают по условному числу часов использования мощности  $N_{\text{усл}}$ , установленной в году,

$$T_{\text{усл}} = \mathcal{E}_{\text{ср. мн}} / N_{\text{усл}}, \quad (36)$$

где  $\mathcal{E}_{\text{ср. мн}}$  — среднееголетняя энергоотдача ГЭС. Рассчитывают ее за характерный период (35...30 лет), а в некоторых случаях и за более короткий (10...15 лет).

Годовая выработка электроэнергии на ГЭС не остается постоянной, а изменяется в зависимости от объема стока, поступающего в водохранилище, и степени его регулирования.

По условному числу часов использования установленной мощности ( $T_{\text{усл}}$ ) определяют неравномерность работы ГЭС в течение года или суток.

Для гидростанций, предназначенных для работы на пиках графика нагрузки,  $T_{\text{усл}} = 3000$  ч, на полупиках  $T_{\text{усл}} = 3000...5000$ , а в базисной части  $T_{\text{усл}} = 6000...6500$  ч. Теоретическим пределом является  $T_{\text{усл}} = 8760$  ч.

Коэффициент использования установленной мощности

$$K_{\text{исп}} = T_{\text{усл}} / T_{\text{год}} = T_{\text{усл}} / 8760, \quad (37)$$

где  $T_{\text{год}}$  — число часов в году,  $T_{\text{год}} = 8760$  ч.

Для ГЭС, работающих соответственно в пиковом, полупиковом и базисном режимах,  $K_{\text{исп}} \leq 0,34, 0,34...0,57$  и  $0,68...0,74$ .

Таким образом, использование ГЭС в разных частях графика нагрузки позволяет экономно расходовать водные ресурсы.

### 9.4.6. Гидросиловое оборудование

Оборудование гидроэлектростанций по функциональному назначению делят на следующие группы.

*Гидросиловое* — гидротурбины и гидрогенераторы (на ГАЭС — обратимые гидромашин и двигатель-генераторы).

*Вспомогательное* — для обеспечения работы гидросилового оборудования.

*Механическое* — затворы, сороудерживающие решетки, краны для обслуживания гидротурбин и гидрогенераторов.

*Электрическое* — токопроводы от генератора, силовые трансформаторы, распределительные устройства, системы собственных нужд, контроля и управления и центральный пульт управления.

Основная часть ГЭС – гидравлическая турбина, преобразующая энергию движущейся воды в механическую энергию вращения рабочего колеса.

Гидротурбина приводит во вращение ротор электрического генератора, переводя механическую энергию в электрическую.

Турбину, соединенную с генератором, называют гидроагрегатом или просто агрегатом ГЭС.

Вся энергия потока состоит из энергии положения, энергии давления (образующих вместе потенциальную энергию) и кинетической энергии. В зависимости от принципа преобразования энергии турбины разделяют на *реактивные*, использующие преимущественно потенциальную энергию потока (энергию движения), и *активные*, использующие кинетическую часть энергии потока (скоростной напор). Турбины этих классов различают по внешним признакам: в активных турбинах рабочее колесо вращается в воздухе и только часть лопастей в какой-то момент времени находится во взаимодействии с водой, а в реактивных рабочее колесо вращается в воде и все его лопасти постоянно находятся в потоке.

Реактивные турбины по направлению потока, подведенного к рабочему колесу и отводимого от него, делят на осевые, у которых поток проходит по колесу в осевом направлении (пропеллерные – ПР и поворотно-лопастные – ПЛ); радиально-осевые, у которых поток поступает в радиальном направлении, сходит в осевом (РО), и диагональные, у которых поток движется по диагонали, а сходит в осевом направлении (ПЛД).

Геометрически подобные гидротурбины различных размеров образуют серии.

Отличают турбины друг от друга по коэффициенту быстроходности, или быстроходности турбины.

*Быстроходность турбины* – способность развивать ту или иную частоту вращения при данных напоре и мощности. Коэффициент быстроходности  $n_s$  численно равен частоте вращения такой турбины, которая при напоре 1 м развивает мощность 1 л. с. (1 л. с. = 0,736 кВт). Поскольку эта частота вращения приведена к определенным, всегда одинаковым условиям работы турбины, ею пользуются для сравнения турбин, различных по размерам, мощности, конструкции и работающих при разных напорах. Применяя турбины различной быстроходности, можно получать частоты вращения гидроагрегата, близкие к оптимальным. Так, при высоких напорах оптимальные частоты вращения получают при тихоходных турбинах, а при низких напорах, наоборот, при быстроходных.

Коэффициент быстроходности современных турбин  $n_s = 2...1200$ . Наибольшей быстроходностью обладают реактивные турбины: ПЛ ( $n_s = 350...1200$ ), ПР ( $n_s = 350...800$ ), РО ( $n_s = 70...350$ ); наименьшей – активные К ( $n_s = 2...40$ ). В равных условиях более быстроходная турбина имеет меньшие габариты агрегата, что существенно уменьшает объем здания ГЭС.

Для каждой электростанции требуются свои турбины по мощности, типу, конструкции, размеру. С целью стандартизации промышленного производства и унификации маркировки разработаны номенклатуры турбин, объединяющие их в классы, системы и серии с напором от 3...4 до 500 м и мощностью от 1...2 до 300...800 МВт.

Маркировка турбин, например ПЛ 40/70-В-500 или РО 80/01-В-300 расшифровывается так: первые буквы – система турбины; далее числитель – предельный напор данной турбины, знаменатель – заводской номер; затем буква, обозначающая положение вала турбины (В – вертикальное, Г – горизонтальное), и цифра, следующая за буквой, – диаметр рабочего колеса в сантиметрах.

Для облегчения выбора серии турбины составлены сводные графики областей применения (рис. 20) с выделением зон рабочих напоров и ориентировочного значения предельной мощности гидроагрегатов.

Оптимальный режим выбирают на основании технико-экономического сравнения вариантов, исходя из требуемых условий работы турбин, определяемых напором, энергетическими и кавитационными показателями, способностью данной гидротурбины работать с высокими КПД без значительных пульсаций давления в заданном диапазоне напоров и нагрузок.

Для управления водным потоком каждая турбина имеет направляющий аппарат. У реактивных турбин он состоит из направляющих лопаток (рис. 21, 22), которые могут одновременно поворачиваться на одинаковый угол и менять направление потока перед рабочим колесом, меняя расход, проходящий через колесо, а следовательно, и мощность турбины. Поток у реактивных турбин, как правило, подводится к направляющему аппарату по спиральной камере круглого (см. рис. 22) или таврового (см. рис. 21) сечения, а отводится от рабочего колеса по отсасывающей трубе, коническая форма которой наилучшим образом использует энергию потока на рабочем колесе, снижая удельные расходы воды на выработку единицы энергии.

У активных турбин функции направляющего аппарата выполняют сопла с регулирующей иглой (рис. 23). Расход воды активных турбин регулируют изменением размера выходного сечения сопла, т. е. изменением диаметра струи при той же скорости.

Основные параметры турбин – номинальный диаметр  $D$  (м), частота вращения  $n$  ( $\text{мин}^{-1}$ ), номинальная мощность  $N$  (МВт) и расчетный напор  $H_p$  (м).

Принципиальные схемы установки турбин на ГЭС показаны на рисунке 24.

*Статический напор* (м) (см. рис. 24)

$$H_{\text{ст}} = \nabla \text{ВВ} - \nabla \text{НБ}, \quad (38)$$

где  $\nabla \text{ВВ}$  и  $\nabla \text{НБ}$  – отметки верхнего и нижнего бьефов, м.

*Напор брутто* (м) – разность удельных энергий потока в сечении

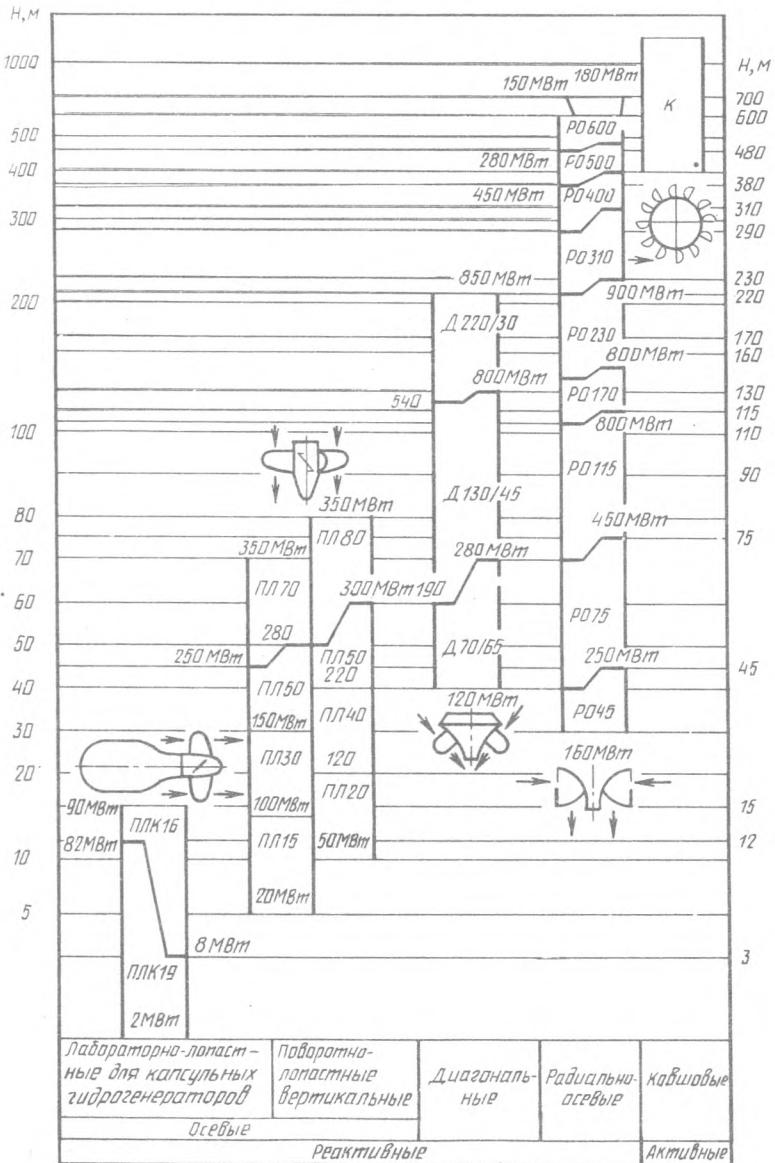


Рис. 20. Сводный график применения гидроурбин

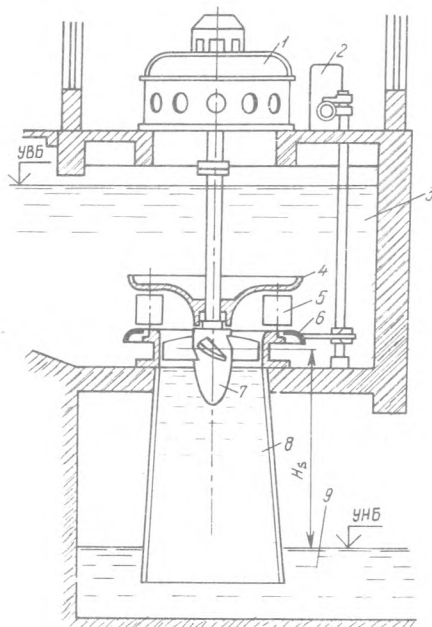


Рис. 21. Установка с пропеллерной турбиной в открытой турбинной камере:

1 — генератор; 2 — автоматический регулятор частоты вращения турбины; 3 — турбинная камера; 4 — крышка турбины; 5 — лопатки направляющего аппарата; 6 — поворотное кольцо привода лопаток направляющего аппарата; 7 — втулка рабочего колеса; 8 — отсасывающая труба; 9 — отводящий канал;  $H_s$  — допустимая высота отсасывания гидротурбины по условиям бескавитационной ее работы

1-1 (рис. 24, а, б) верхнего бьефа до входа в энергетические водоводы и в сечении 2-2, расположенном в нижнем бьефе за отсасывающими трубами гидротурбин

$$H_{бр} = H_{ст} + \frac{\alpha_1 v_1^2}{2g} - \frac{\alpha_2 v_2^2}{2g}. \quad (39)$$

Напор нетто (м), который используется турбиной, — разность напора брутто и гидравлических потерь  $h_{пот}$  в подводящем и отводящем водоводах (по длине и местные):

$$H_{нт} = H_{ст} + \frac{\alpha_1 v_1^2}{2g} - \frac{\alpha_2 v_2^2}{2g} - h_{пот}. \quad (40)$$

Поскольку разность скоростных напоров в формуле (40) невелика, ее можно не учитывать, тогда напор (м) турбины

$$H = H_{ст} - h_{пот}, \quad (41)$$

который широко используют при расчетах.

При установке на гидростанции активных турбин с выпуском воды из сопла в атмосферу происходит дополнительная потеря напора  $h_{стр}$  (рис. 24, в), равная разности отметок оси струи и уровня нижнего бьефа. Напор турбин в этом случае

$$H = H_{ст} - h_{стр} - h_{пот}. \quad (42)$$

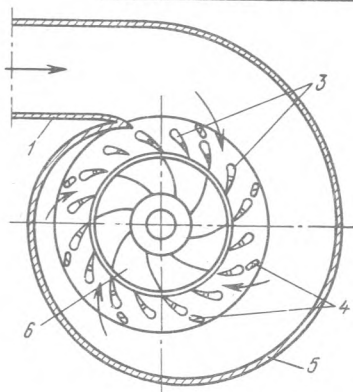
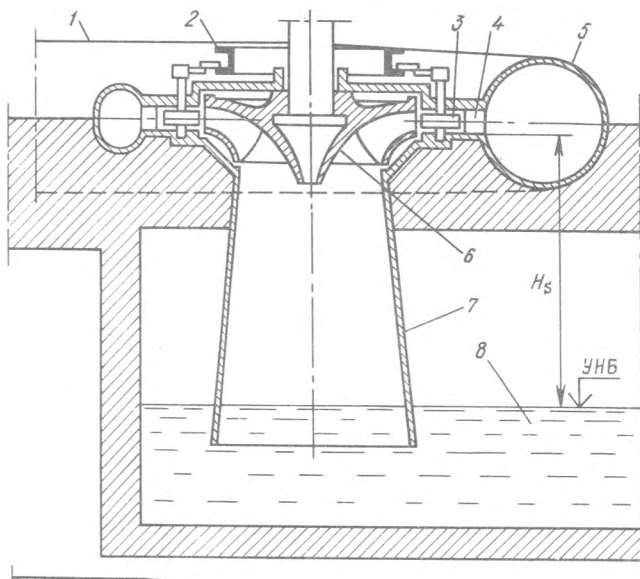


Рис. 22. Установка с радиально-осевой турбиной:

1 — трубопровод; 2 — поворотное кольцо привода лопаток направляющего аппарата; 3 — лопатки направляющего аппарата; 4 — статорные колонны; 5 — спиральная турбинная камера; 6 — рабочее колесо турбины; 7 — отсасывающая труба; 8 — отводящий канал

Мощность, отбираемая турбиной от протекающей жидкости, можно вычислить по формуле (29), заменив  $H_{уш}$  на напор  $H$ , рассчитанный по формуле (41) или (42). Однако не вся эта мощность передается валу и полезно используется, так как энергия теряется в самой турбине. Это учитывают коэффициентом полезного действия (КПД) турбины  $\eta_T$ , который составляет 0,90...0,96.

Мощность (кВт) гидротурбины согласно уравнению (29) может быть выражена так:

$$N_T = 9,81 Q_T H_T \eta_T \quad (43)$$

где  $Q_T$ ,  $H_T$  — расход и напор турбины соответственно  $\text{м}^3/\text{с}$  и  $\text{м}$ .

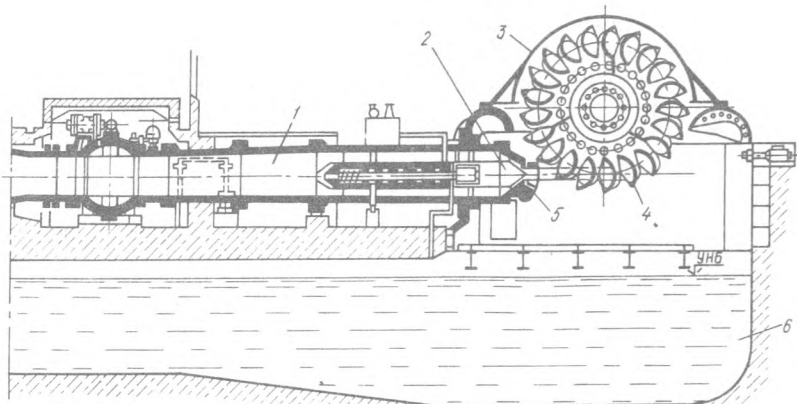


Рис. 23. Установка с активной (горизонтальной односопловой ковшовой) турбиной:

- 1 — турбинный трубопровод; 2 — сопло с регулирующей иглой; 3 — защитный кожух; 4 — рабочее колесо; 5 — диффлектор (отклонитель струи); 6 — отводящий канал

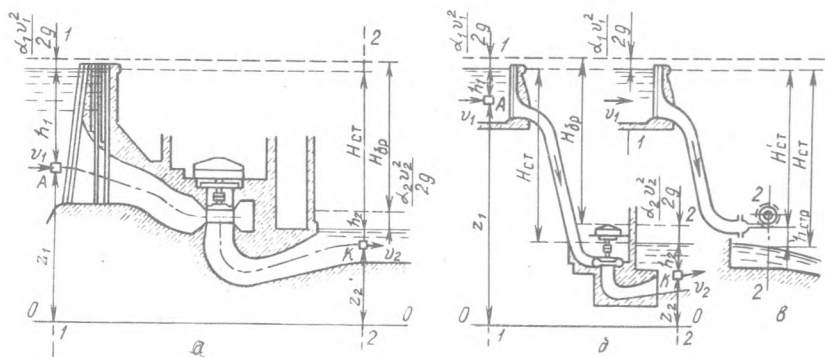


Рис. 24. Определение напоров ГЭС:

*a* — русловой; *b* — деривационной; *в* — с ковшовыми гидротурбинами; *z* — высота расположения центра тяжести данного живого сечения потока над плоскостью сравнения *O—O*, м;  $h = p / \rho g$  — пьезометрическая высота, равная глубине погружения центра тяжести данного живого сечения под уровень воды, м;  $p$  — избыточное давление, Па;  $v$  — средняя скорость течения воды в данном живом сечении, м/с;  $\alpha$  — коэффициент Кориолиса, равный отношению кинетической энергии потока при действительном распределении скорости по сечению к кинетической энергии потока, подсчитанной по средней скорости

Однако на ГЭС мощность принято измерять на выводах генератора. Там она меньше на величину электрических потерь в генераторе, учитываемых его КПД. Ориентировочно  $\eta_{\text{ген}} = 0,97 \dots 0,98$ . Коэффициент полезного действия агрегата

$$\eta_a = \eta_t \eta_{\text{ген}} \quad (44)$$

где  $\eta_t, \eta_{\text{ген}}$  — соответственно КПД гидротурбины и генератора.

Чем выше  $\eta_a$ , тем эффективнее используются водные ресурсы.

При проектировании водохозяйственного комплекса и вычислении пусका на ГЭС ( $W_{\text{ГЭС}}$ ) пользуются установленной мощностью  $N_{\text{уст}}$  суммарной паспортной (номинальной) мощностью (кВт) всех гидротурбин, установленных на ГЭС:

$$N_{\text{уст}} = N_{\text{раб. гар}}^{\text{ГЭС}} + N_{\text{рез}} \quad (45)$$

где  $N_{\text{раб. гар}}^{\text{ГЭС}}$  — рабочая гарантированная мощность ГЭС, участвующая вместе с другими электростанциями в покрытии нагрузки системы;  $N_{\text{рез}}$  — резервная мощность, обеспечивающая вместе с другими электростанциями высокое качество и надежность электроснабжения потребителей.

Установленную мощность ГЭС выбирают на основе экономических расчетов, которые заключаются в экономической оценке вытесняемой мощности тепловых электростанций, обосновании размещения на ГЭС резервной мощности, выбора числа агрегатов при различных режимах работы ГЭС. Выбору  $N_{\text{уст}}$  предшествуют водно-энергетические расчеты.

Электрическая мощность, подведенная к потребителю, меньше мощности, производимой ГЭС. Сумму всех потерь при передаче электрической мощности от ГЭС до потребителя и при многократных преобразованиях ее в повышающих и понижающих трансформаторах можно оценить КПД системы передачи и преобразований  $\eta_{\text{пер}} = 0,94 \dots 0,96$ .

Гидроэнергетика обычно заинтересована в получении возможно больших расходов воды в зимний период, когда электропотребление максимально. Для ГЭС необходимо недельное и суточное регулирование с большим снижением мощности ГЭС ночью, вплоть до полной остановки всех турбин. Если нижний бьеф ГЭС не подперт, то по санитарным условиям необходимо давать обязательный пуск воды во все часы суток, что для ГЭС является обязательным ограничением суточного регулирования.

Экономическую эффективность работы агрегатов ГЭС определяют количеством энергоресурсов, которые затрачиваются на выработку 1 кВт·ч электроэнергии. Это так называемый удельный расход энергоресурса (воды).



### 9.4.7. Компоновки ГЭС в комплексном гидроузле

**Гидроузел** – комплекс взаимосвязанных гидротехнических сооружений. При комплексном использовании водотока в состав узла для каждого участника ВХК включают соответствующее сооружение, например судоходный шлюз или судоподъемник, рыбопропускные сооружения, водозаборные сооружения для орошения, водоснабжения.

Основной принцип экономического обоснования компоновки сооружений – это достижение минимума суммарных приведенных затрат по ВХК.

При компоновке сооружений гидроузлов необходимо обеспечить: надежную, безопасную, удобную и экономичную эксплуатацию ГЭС и всех сооружений ВХК с возможно меньшими потерями напора и расхода воды;

сооружение всего комплекса в возможно короткий срок при оптимальных суммарных затратах;

удобство проведения работ;

наиболее безопасный попуск расходов воды в период строительства;

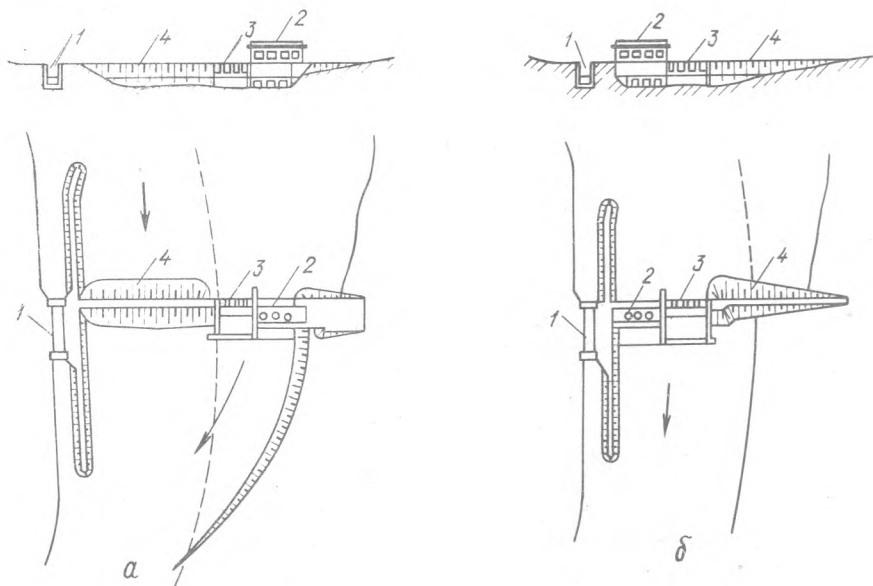


Рис. 25. Компоновка низконапорных гидроузлов:

*а* – пойменная; *б* – русловая; 1 – судопропускной шлюз; 2 – здание ГЭС; 3 – вьдосливная плотина; 4 – глухая плотина

охрану природных комплексов и улучшение природных условий.

Компоновка гидроузла с ГЭС руслового типа определяется параметрами плотины и здания ГЭС. Как было показано выше, существует два основных типа компоновки сооружений гидроузла: пойменная и русловая.

При пойменной компоновке все бетонные сооружения и часть грунтовой плотины возводят на пойме одного или обоих берегов (рис. 25, а). Пойменная компоновка позволяет уменьшить высоту ограждающих перемычек котлована основных бетонных сооружений. Расход воды при этом идет по основному руслу, что облегчает условия пропуска ледохода и паводковых расходов.

При русловой компоновке (рис. 25, б) здания ГЭС и водосливную плотину располагают в естественном русле реки, поэтому возводят их одновременно в две очереди. Котлован в этом случае огораживают довольно высокими перемычками, рассчитанными на пропуск паводков и ледоходов через стесненную часть русла. Здания ГЭС обычно сооружают на противоположном от судоходного шлюза берегу.

Компоновка сооружений с приплотинной ГЭС в значительной степени зависит от ширины створа, типа плотины и напора (рис. 26).

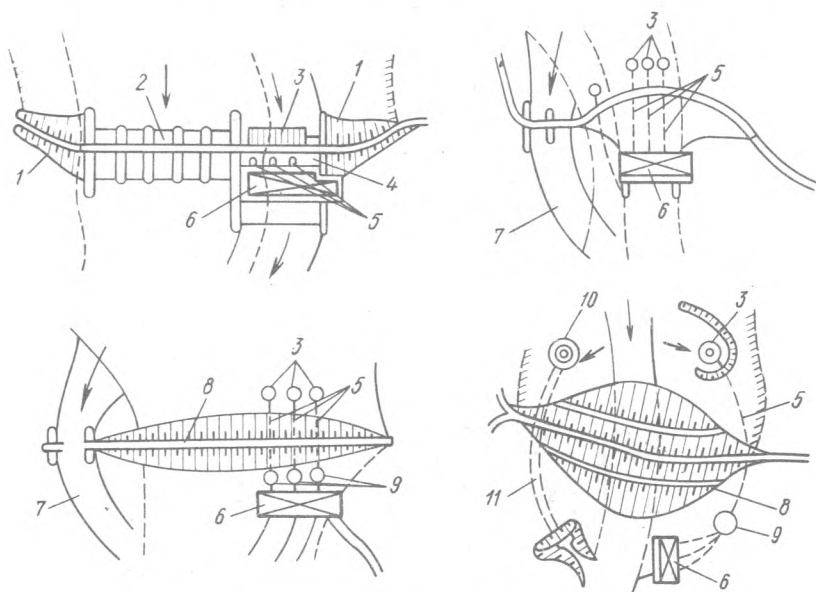


Рис. 26. Схемы компоновки гидроузлов с приплотинной ГЭС:

1 — сопрягающая дамба; 2 — водосливная плотина; 3 — водоприемник; 4 — стационарная плотина; 5 — турбинные водоводы; 6 — здание ГЭС; 7 — береговой водосброс; 8 — грунтовая или каменно-набросная плотина; 9 — уравнительный резервуар; 10 — шахтный водосброс; 11 — водосбросный туннель

При бетонной плотине наземное здание станции непосредственно примыкает к ее низовой грани. Вода к агрегатам подводится по напорному трубопроводу, который размещают либо в теле плотины, либо на ее низовой грани (рис. 27).

В состав гидроузлов наряду с плотиной и зданием ГЭС могут входить также судоходные и рыбопропускные сооружения. При средних напорах применяют многокамерные и шахтные судоходные шлюзы, а при высоких напорах — судоподъемники.

Если плотина грунтовая или из каменной наброски, то здание станции строят чаще всего на некотором удалении от нее, а продольная ось его может быть повернута по отношению к оси плотины на некоторый угол. Водоприемник, турбинные водоводы и водосбросы с плотиной обычно не совмещают.

Сооружения деривационных ГЭС устанавливают в двух узлах — головном и станционном, соединенных между собой деривацией.

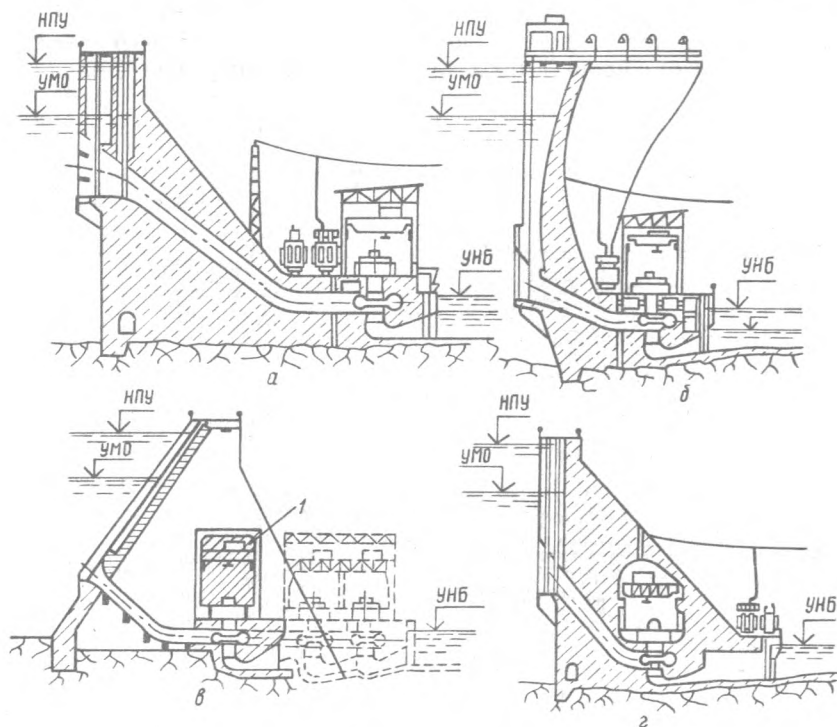


Рис. 27. Схемы приплотинных зданий ГЭС:

*а* — за массивной бетонной плотиной; *б* — за арочной плотиной; *в* — за контрфорсной плотиной; *г* — внутри тела гравитационной плотины; *1* — прорезь в контрфорсе

Компоновка головных узлов определяется типом и размерами плотины и водосборных сооружений.

Плотины в деривационных ГЭС с безнапорной деривацией возводятся, как правило, водосливные, с низкими порогами, оборудованные затворами, перекрывающими русло горных рек часто по всей ширине. Входное сечение водозабора должно иметь порог, возвышающийся не менее чем на 1...2 м над дном реки для задержания донных наносов.

Для деривационных ГЭС с напорной деривацией типичны сравнительно высокие плотины и глубинные водоприемники, которые позволяют забирать воду при сильных колебаниях уровня воды в водохранилище. Глубинный водоприемник (берегового или башенного типа) размещают преимущественно в стороне от плотины.

Состав сооружений станционного гидроузла деривационных ГЭС и их компоновка зависят от типа деривации, напора, длины турбинных водоводов, геологических и топографических условий. Обычно все сооружения станционного узла располагают на относительно крутых склонах, стремясь сократить длину турбинных трубопроводов, которые могут быть стальными, железобетонными и деревянными. Железобетонные монолитные и деревянные трубопроводы используют при напорах до 40...50 м и пологих трассах с углом наклона до 20°. Сборные железобетонные трубопроводы с предварительно напряженной арматурой укладывают при напорах до 150 м. Стальные трубопроводы прокладывают на крутых склонах и практически неограниченных напорах. По условиям эксплуатации предпочтительнее раздельное питание турбин, при длинных трубопроводах более целесообразно объединенное питание турбин. Подвод трубопровода к зданию может быть фронтальным и продольным.

При создании ГЭС с безнапорной деривацией канал проектируют с учетом многоцелевого назначения, например ирригационно-энергетический, транспортно-энергетический. В оросительно-энергетических системах напорные бассейны выполняют роль вододелителей, распределяющих воду между ГЭС и оросительным или обводнительным каналом. При этом в напорных бассейнах предусматривается возможность сброса избытков поступающей воды при изменении мощности ГЭС, аварийных случаях. Предусматривается подача воды для нижележащих водопользователей при остановке ГЭС.

В состав сооружений ГЭС с безнапорной деривацией может входить также бассейн суточного регулирования (БСР).

#### 9.4.8. Здания ГЭС

Здание ГЭС – это гидротехническое сооружение, в котором с помощью комплекса гидросилового, электрического, механического и вспомогательного оборудования механическую энергию воды преобразуют в электрическую, передаваемую потребителям. Конструкция и компоновка здания ГЭС зависят от природных условий, схемы кон-

центрации напора, его величины, типа и параметров гидроагрегатов, трансформаторов. Габариты здания определяются размерами агрегатных блоков, в частности длина его – числом агрегатных блоков и размером монтажной площадки. В свою очередь, габариты блока зависят от мощности (напора и расхода воды) турбин, размеров генератора, а ширина – размером спиральной камеры.

Тип и конструкция здания должны быть обоснованы и обеспечивать надежную работу оборудования и удобные условия его эксплуатации.

Типы зданий ГЭС классифицируют:

по установленной мощности  $N_{уст}$ : мощные ГЭС ( $N_{уст} > 1000$  МВт), средней мощности ( $15 < N_{уст} < 1000$  МВт) и малой мощности ( $N_{уст} < 10...15$  МВт);

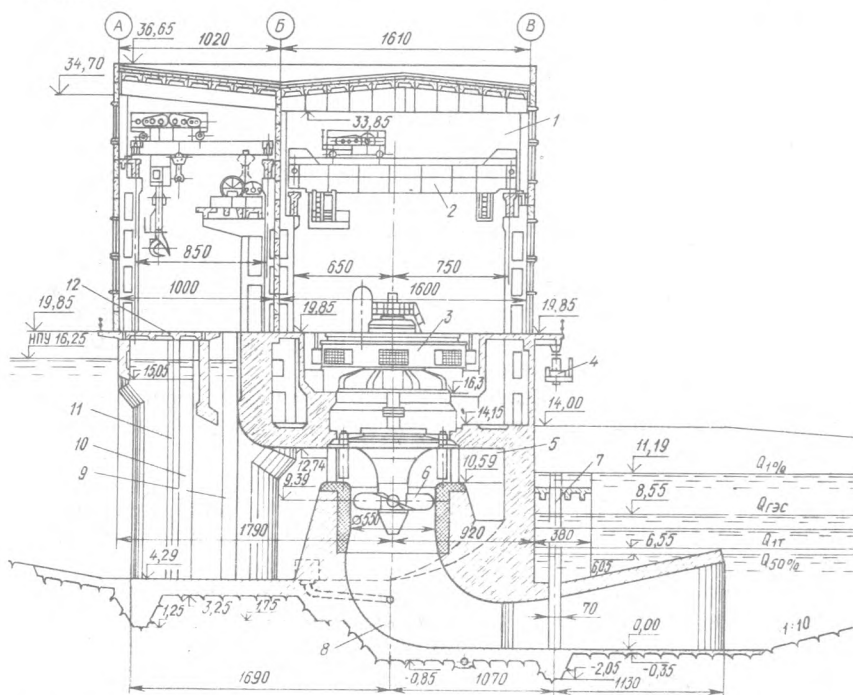


Рис. 28. Поперечный разрез низконапорной ГЭС руслового типа с поворотно-лопастными турбинами (Пологорская ГЭС на р. Выг;  $H_p = 8$  м;  $N = 30$  МВт;  $D = 5,5$  м;  $Q = 147$  м<sup>3</sup>/с;  $n = 68,2$  об/мин):

1 – машинный зал; 2 – мостовой кран; 3 – генератор; 4 – тельфер для установки ремонтного заграждения; 5 – бетонная спиральная турбинная камера; 6 – поворотно-лопастная турбина; 7 – паз ремонтного заграждения отсасывающей трубы; 8 – изогнутая отсасывающая труба; 9 – паз быстродействующего затвора; 10 – паз ремонтного заграждения и решетки; 11 – паз грейфера; 12 – съемная железобетонная плита

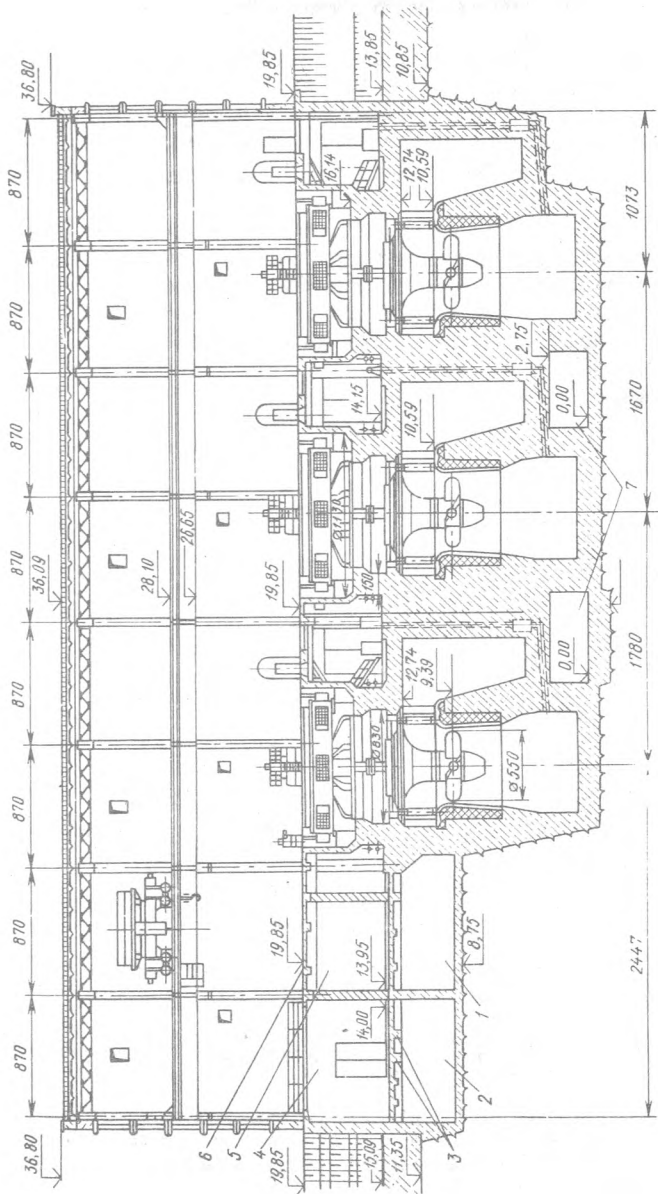


Рис. 29. Продольный разрез по оси агрегатов Пологорской ГЭС:

1 — помещение насосов технического водоснабжения; 2 — механическая мастерская; 3 — железнодорожный путь для доставки оборудования; 4 — перегрузочное помещение; 5 — генераторное распределительное устройство; 6 — монтажная площадка; 7 — сливные полости стемы откачки

по напору (максимальному): высоконапорные ( $H_{\max} > 400$  м), средненапорные ( $50 \text{ м} < H_{\max} < 400$  м), низконапорные ( $H_{\max} < 50$  м).

По компоновке (расположению) в составе гидроузла здания ГЭС делят на три основных типа:

здания русловых ГЭС – здания, воспринимающие напор (рис. 28, 29);

здания приплотинных ГЭС – здания, не воспринимающие напор и размещаемые за плотиной (рис. 30);

здания деривационных ГЭС – здания, стоящие отдельно, автономно (рис. 31).

По способу сброса воды из верхнего бьефа в нижний здания русловых ГЭС делят на не совмещенные с водосбросами (излишки воды из верхнего бьефа сбрасывают через водосливные отверстия плотины или другие устройства, находящиеся вне здания ГЭС) (см. рис. 26) и совмещенные с водосбросами [обычно располагают в массивной (подводной) части здания] (рис. 32).

По типу верхнего строения здания ГЭС различают:

закрытые – с внутренним расположением подъемно-транспортного оборудования (см. рис. 28);

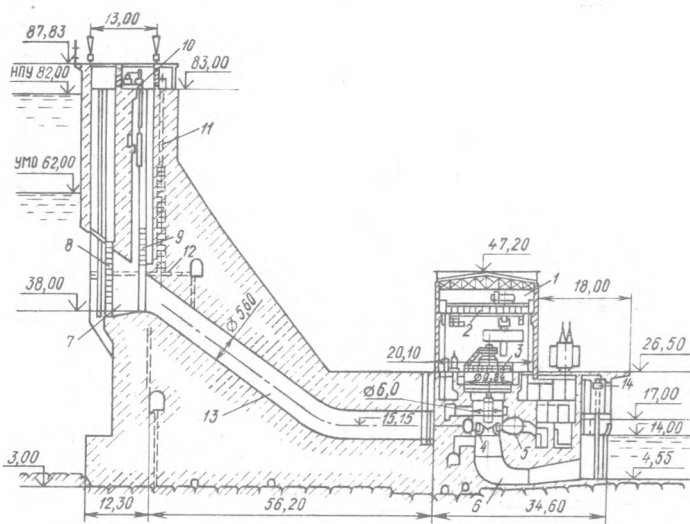


Рис. 30. Здание приплотинной ГЭС с радиально-осевыми турбинами (Бухтарминская ГЭС на р. Иртыш:  $H_p = 67$  м;  $N = 675$  МВт;  $D = 5$  м;  $Q = 142 \text{ м}^3/\text{с}$ ):

1 – машинный зал; 2 – мостовой кран; 3 – генератор; 4 – радиально-осевая турбина; 5 – металлическая спиральная турбинная камера; 6 – изогнутая отсасывающая труба; 7 – водоприемник; 8 – решетка; 9 – плоский затвор; 10 – гидроподъемник; 11 – воздуховод; 12 – байпас для заполнения трубопровода; 13 – турбинный трубопровод; 14 – тельфер для операций с ремонтными заграждениями

полуоткрытые – основное подъемное оборудование (портальный или козловой кран) размещают над машинным залом, который представляет собой низкое помещение со съёмными крышками над генераторами (рис. 33, б, в);

открытые – машинный зал отсутствует, а генераторы закрывают съёмными колпаками (рис. 34, а, б, в). Подъемным оборудованием здесь служит также козловой кран.

По расположению относительно земли здания гидроэлектростанций делают:

на наземные – корпус здания станции расположен на поверхности земли;

полуподземные – корпус здания расположен на незначительной глубине, например в траншеях (рис. 34); подземные – корпус здания расположен ниже поверхности земли. Такие здания сооружают при деривационной схеме концентрации напора, когда деривацию выполняют в виде туннеля (рис. 35);

встроенные – здания располагают в полости бетонной плотины или между контрфорсами контрфорсной плотины, или внутри грунтовой плотины (см. рис. 27).

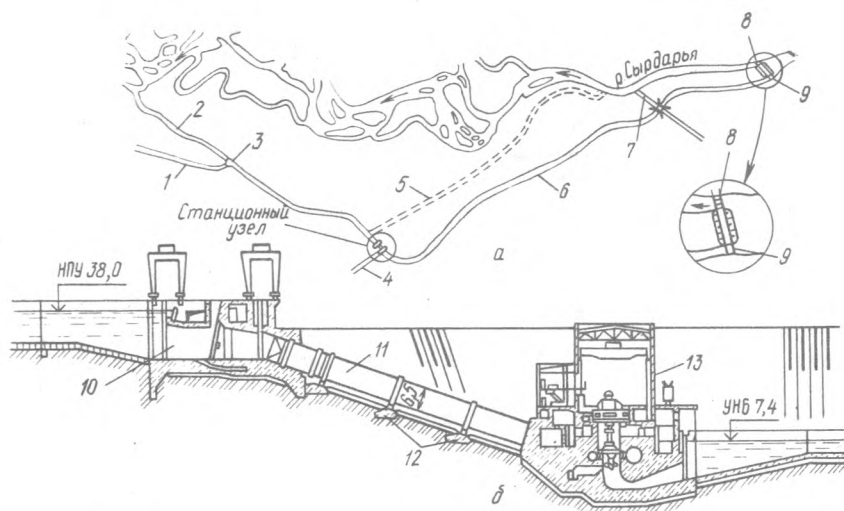


Рис. 31. План и станционный узел сооружений деривационной ГЭС (Фархадская ГЭС на р. Сырдарья:  $H_p = 32,5$  м;  $N = 126$  МВт;  $D = 4$  м);

а – план; б – станционный узел сооружений; 1 – магистральный оросительный канал; 2 – сброс; 3 – концевой вододелитель; 4 – оросительный канал Баяут; 5 – бывший оросительный канал; 6 – деривационный канал; 7 – канал Ширин-Сай; 8 – бетонная водосливная плотина; 9 – водоприемник; 10 – напорный бассейн; 11 – турбинный трубопровод; 12 – промежуточные опоры; 13 – здание станции



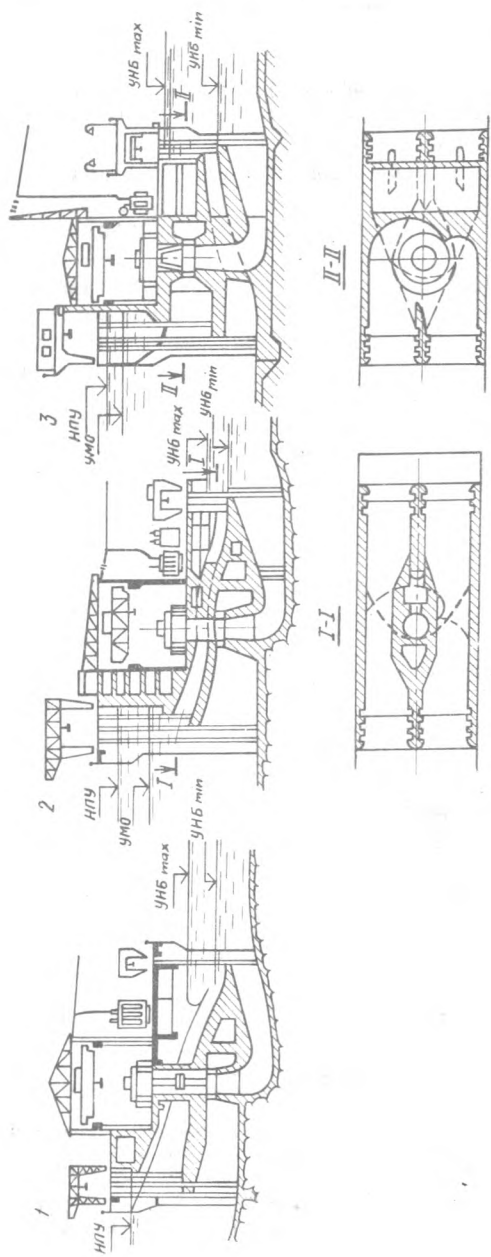


Рис. 32. Возможные схемы смещенных зданий ГЭС:

1 — расположение безнапорных водобросных устройств между спиральной камерой и генератором; 2 — расположение напорных водобросных устройств между спиральной камерой и генератором; 3 — расположение напорных водобросов под спиральной камерой

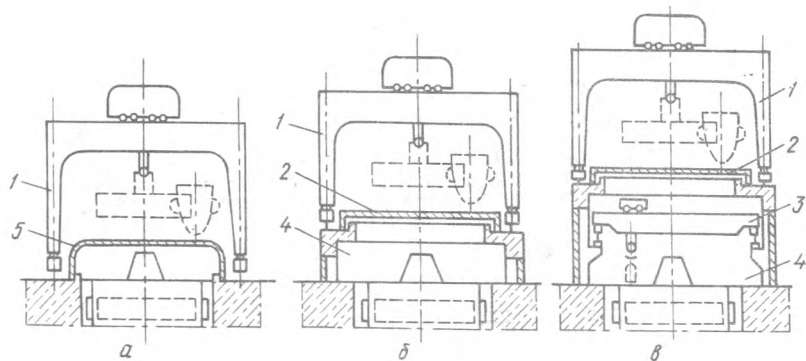


Рис. 33. Облегченные машинные залы:

*a* — открытый; *б* — полукрытый; *в* — полукрытый с внутренним краном; 1 — козловой кран; 2 — съемные крышки; 3 — внутренний мостовой кран; 4 — закрытая часть машинного зала; 5 — съемный колпак

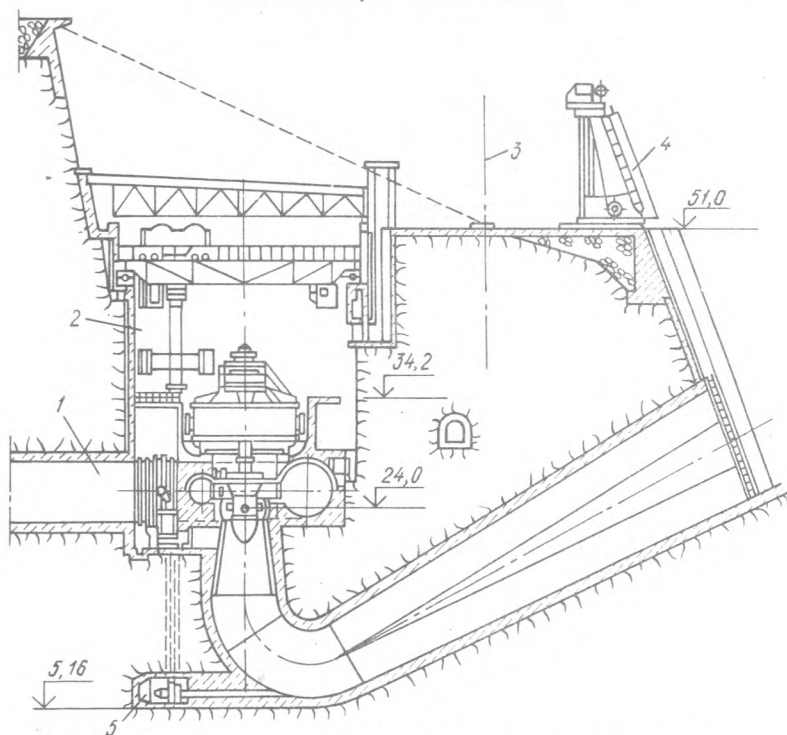


Рис. 34. Полуподземное здание ГЭС (Вилойская ГЭС на р. Вилой:  $H_p = 55,5$  м;  $N = 616$  МВт;  $D = 4,1$  м):

1 — турбинный водовод; 2 — машинный зал; 3 — ось подъездного пути; 4 — кран для ремонтного ограждения от засасывающих труб; 5 — дренажная галерея

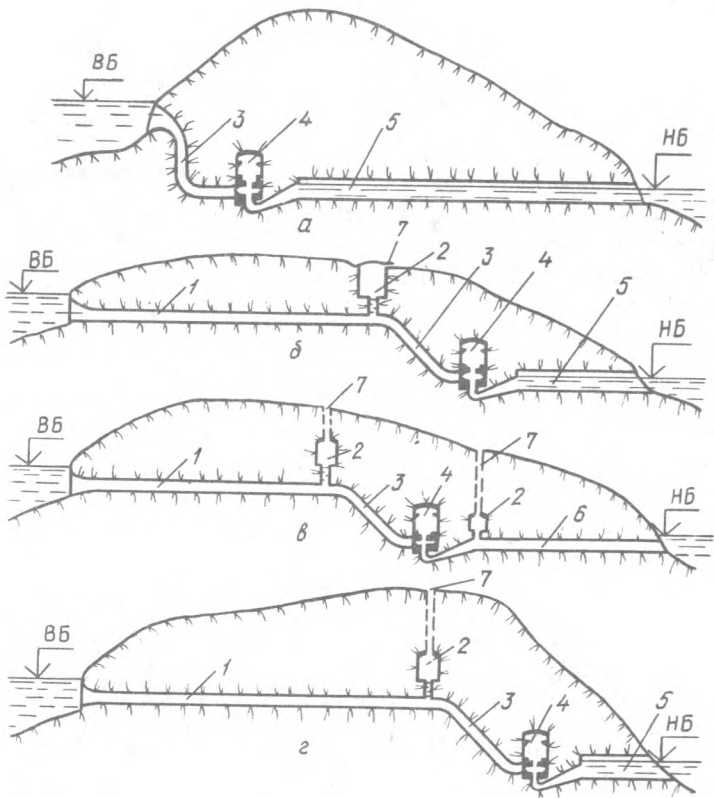


Рис. 35. Схема деривационных ГЭС с подземным размещением машинного зала:

*а* — в начале туннеля; *б* и *в* — в средней части туннеля; *г* — в конце туннеля; 1 — подводящий напорный туннель; 2 — уравнительный резервуар; 3 — турбинные водоводы; 4 — машинный зал; 5, 6 — безнапорный и напорный отводящие туннели; 7 — воздуховод

#### Основные части здания ГЭС:

верхнее строение, состоящее из машинного зала, монтажной площадки, производственных и служебных помещений;

нижняя массивная часть, в пределах которой размещают проточный тракт гидромашины, подгенераторную шахту, а также другие устройства и помещения.

Для определения размеров блока агрегатов необходимо предварительно установить размеры проточной части и положение турбины относительно уровня верхнего и нижнего бьефов. Предельную высоту поднятия турбины (высоту отсасывания) над уровнем нижнего бьефа (см. рис. 21, 22) находят из формулы

$$H_s \leq H_a - \frac{\nabla}{900} - K \sigma H, \quad (46)$$

где  $H_a$  — напор, соответствующий атмосферному давлению;  $\nabla$  — абсолютная отметка положения турбины, м;  $K$  — коэффициент запаса,  $K = 1,05 \dots 1,1$ ;  $\sigma$  — коэффициент кавитации турбин (чем выше быстроходность турбин, тем он больше). Для РО турбин  $\sigma = 0,03 \dots 0,27$ , ПЛ  $\sigma = 0,21 \dots 1,4$ ;  $H$  — напор ГЭС.

Для ПЛ турбин с вертикальным валом высоту отсасывания  $H_s$  отсчитывают от оси поворота лопастей, для РО (см. рис. 24) и диагональных турбин — от нижней плоскости направляющего аппарата, для горизонтальных турбин — от верхней отметки камеры рабочего колеса. Высоту отсасывания считают положительной ( $+H_s$ ), если уровень воды находится ниже указанной плоскости, и отрицательной ( $-H_s$ ), если выше.

Верхнее строение машинного зала защищает обслуживающий персонал и оборудование от неблагоприятных климатических воздействий. Оно мало отличается от обычных промышленных строений, и делают его, как правило, каркасным, чтобы можно было установить монтажный мостовой кран. Высоту машинного зала назначают из условия транспортирования вдоль него наиболее громоздкой монтажной детали над работающими агрегатами (как правило, это роторы генератора). Высота крупных ГЭС достигает 20...25 м. С целью снижения стоимости здания верхнее строение иногда делают пониженным (Иваньковская, Горьковская и Саратовская ГЭС на Волге) или совсем убирают (Кременчугская и Днепродзержинская ГЭС на Днепре), а кран устанавливают снаружи.

Общий элемент всех типов зданий ГЭС — монтажная площадка (см. рис. 29), которую обычно размещают в конце здания (см. рис. 29) у берега и обслуживают теми же кранами, что и машинный зал. На уровне пола монтажной площадки делают подъездной путь для доставки оборудования в машинный зал. Габариты монтажной площадки определяются условиями доставки и раскладки на ней основных частей одного гидроагрегата при его ремонте в период эксплуатации. При большом числе агрегатов иногда строят две монтажные площадки.

В здании ГЭС размещают вспомогательные помещения (см. рис. 29) (оперативно-производственные, административно-хозяйственные, бытовые) и вспомогательные службы (техническое водоснабжение, пожаротушение генераторов, осушение спиральных камер и отсасывающих труб, масляное хозяйство, пневматическое хозяйство, дренажные хозяйства).

#### 9.4.9. Гидроаккумулирующие электростанции

Один из возможных путей экономии водных ресурсов при выработке электроэнергии — создание гидроаккумулирующих станций (ГАЭС). В отличие от обычных ГЭС они являются комплексом сооруже-

ний и оборудования не только для генерирования электроэнергии, но и ее потребления для преобразования в потенциальную энергию поднятой воды.

Работа ГАЭС заключается в смене двух отдельных во времени режимов: накопления энергии или заряда и ее отдачи потребителям (разрядка ГАЭС) (рис. 36).

Заряд ГАЭС представляет собой подъем воды гидромашины с электрическим приводом из нижнего в верхнее водохранилище (бассейн). Такой режим работы происходит во время снижения электропотребления ночью, в выходные и праздничные дни, а также в сезонном интервале времени. При разряде, происходящем в часы максимума нагрузки или аварии на других станциях, потенциальная энергия поднятой воды преобразуется в электрическую. При этом вода сбрасывается из верхнего в нижний бассейн, т. е. пропускается через гидромашину, которая работает совместно с электромашинами генерирующими электрический ток, как и на обычных ГЭС.

ГАЭС, несмотря на многообразие условий строительства и эксплуатации, классифицируют по следующим основным признакам.

1. По напору – низконапорные ( $H = 100$  м), средненапорные ( $H = 100 \dots 700$  м), высоконапорные ( $H = 700$  м).

2. По возможности использования речного стока для выработки электроэнергии совместно с гидроаккумулированием – на совмещенные, не совмещенные с ГЭС и ГАЭС в схеме переброски стока.

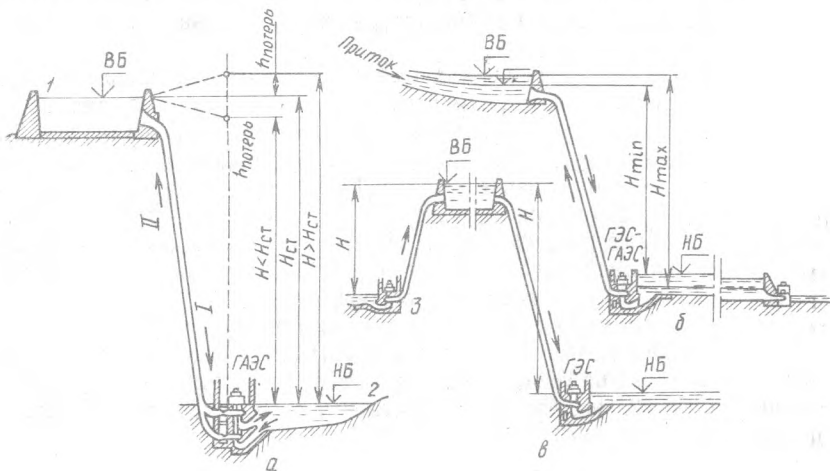


Рис. 36. Схемы ГАЭС:

а — простого аккумулирования; б — смешанного типа; в — с неполной высотой подкачки; I — турбинный режим; II — насосный режим; 1, 2 — верхний и нижний бассейны; 3 — насосная станция

Если источником энергии, получаемой при заряде ГАЭС, являются только другие станции, то такие ГАЭС не совмещены с ГЭС. Естественная приточность воды в верхний бассейн этих ГАЭС (чистого аккумуляирования) практически отсутствует. При совмещенном гидроаккумуляировании к воде, перекачиваемой из нижнего в верхний бьеф, добавляется речной сток, который увеличивает энергию разряда на выработку электроэнергетики обычной ГЭС. Такие установки называют ГАЭС – ГАЭС.

3. По продолжительности одного цикла заряда–разряда ГАЭС на всю полезную вместимость бассейнов – суточного (рис. 37), недельного (рис. 38), сезонно-годового аккумуляирования.

Для ГАЭС несомещенного гидроаккумуляирования с искусственно создаваемыми бассейнами характерно суточное аккумуляирование, которое иногда сочетается с его недельным циклом.

Особенность ГАЭС с неполной высотой подкачки в бассейн на водоразделе состоит в расположении насосной и гидроэлектрической станций на значительном расстоянии друг от друга. Такую схему иногда называют раздельной.

По длительности работы ГАЭС суточного аккумуляирования в турбинном режиме принято разделять на пиковые, выдающие электроэнергетику не более 6 ч в сутки, и полупиковые, выполняющие эту функцию за 6...16 ч (см. рис. 37), если верхняя часть графика обеспечивается за счет работы других электростанций.

Суточный цикл гидроаккумуляирования применяют на ГЭС–ГАЭС с водохранилищами годового и многолетнего регулирования стока. Весной и летом речной сток идет на заполнение водохранилища и сбрасывается настолько, насколько это необходимо для удовлетворения требования ВХК. В это время года энергетические требования удовлетворяют главным образом за счет гидроаккумуляирования.

4. По типу основного гидроэнергетического оборудования – с раздельными насосными и турбинными агрегатами, которые образуют четырехмашинную схему оборудования; с комбинированными агрегатами – трехмашинную схему (рис. 39) (т. е. генератор-двигатель, насос и турбины) и обратимыми агрегатами – двухмашинную схему (рис. 40) (гидрогенератор-двигатель и обратимая гидромашина.)

Осевые обратимые машины применяют для напоров до 40 м, диагональные – 30...150, радиально-осевые – 30...60 м. При более высоких напорах помимо комбинированного оборудования перспективны многоступенчатые радиально-осевые гидромшины.

5. По типу расположения здания – наземные, подземные, полуподземные.

Гидроаккумуляирующие электростанции предназначены для покрытия пиковой части суточного графика нагрузки энергосистемы. По мере роста электропотребления не только промышленности, но и сельским хозяйством и коммунально-бытовым сектором прослеживается тенденция к разуплотнению графиков нагрузки энергосистемы,

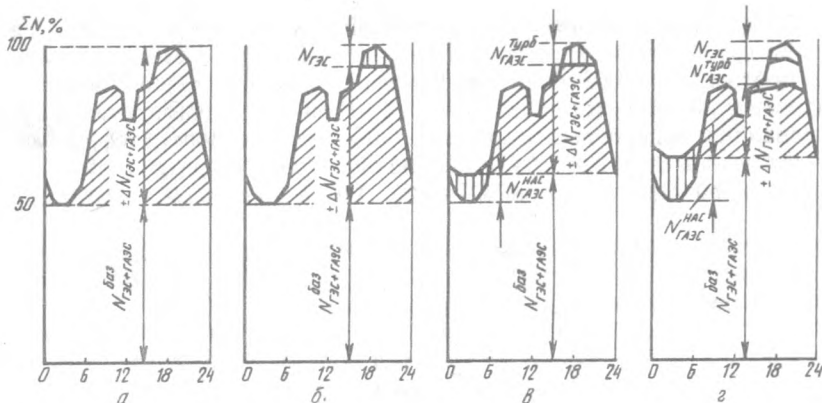


Рис. 37. Варианты (а, б, в, г) размещения мощности ГЭС и ГАЗ в графике суточной нагрузки

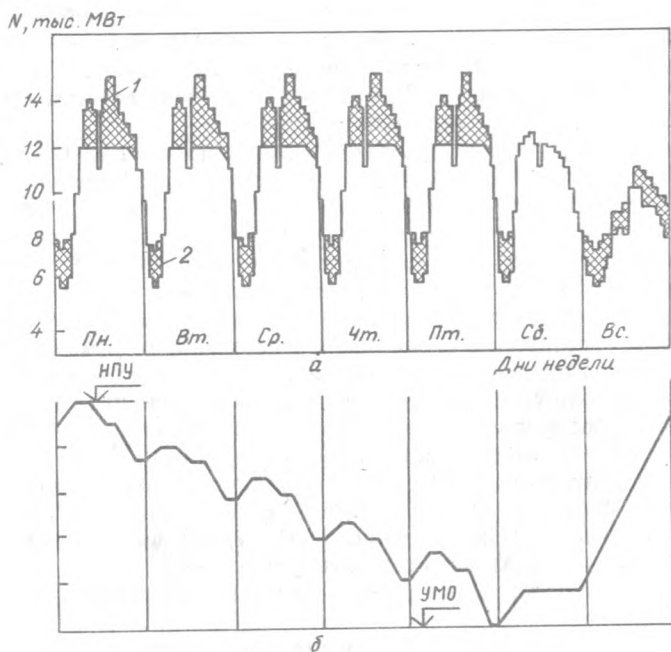


Рис. 38. Работа ГАЗ с недельным циклом аккумуляции:

а — в графике нагрузки; б — изменение уровня в верхнем бассейне; 1 — турбинный режим; 2 — насосный режим

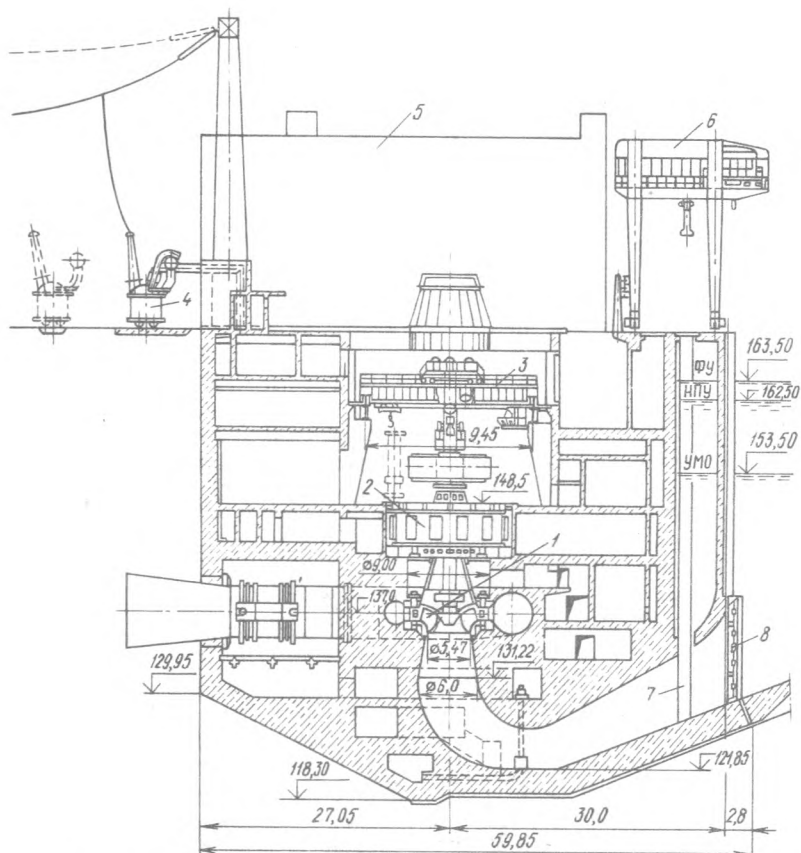


Рис. 39. Здание гидроаккумулирующей электростанции, выполненное по трехмашинной схеме с вертикальными агрегатами:

1 — шаровый затвор на патрубке насоса; 2 — насос; 3 — муфта сцепления; 4 — турбина; 5 — шаровый затвор на турбинном трубопроводе; 6 — реверсивная (обратимая) электрическая машина; 7, 8 — отсасывающая и всасывающая трубы

повышению их суточной неравномерности и интенсивности нарастания нагрузки. Условия работы электростанций в значительной мере определяются формой графиков нагрузки. Чем неравномернее график нагрузки, тем тяжелее условия для электростанций, работающих на его покрытие. Наиболее приспособлены к переменной нагрузке гидроэлектрические станции и наименее — тепловые и атомные. Однако мощности существующих и намеченных к строительству ГЭС, а также их регулирующих возможностей (по водохранилищу) недостаточны для покрытия пиков графиков нагрузки мощных энергосистем. В



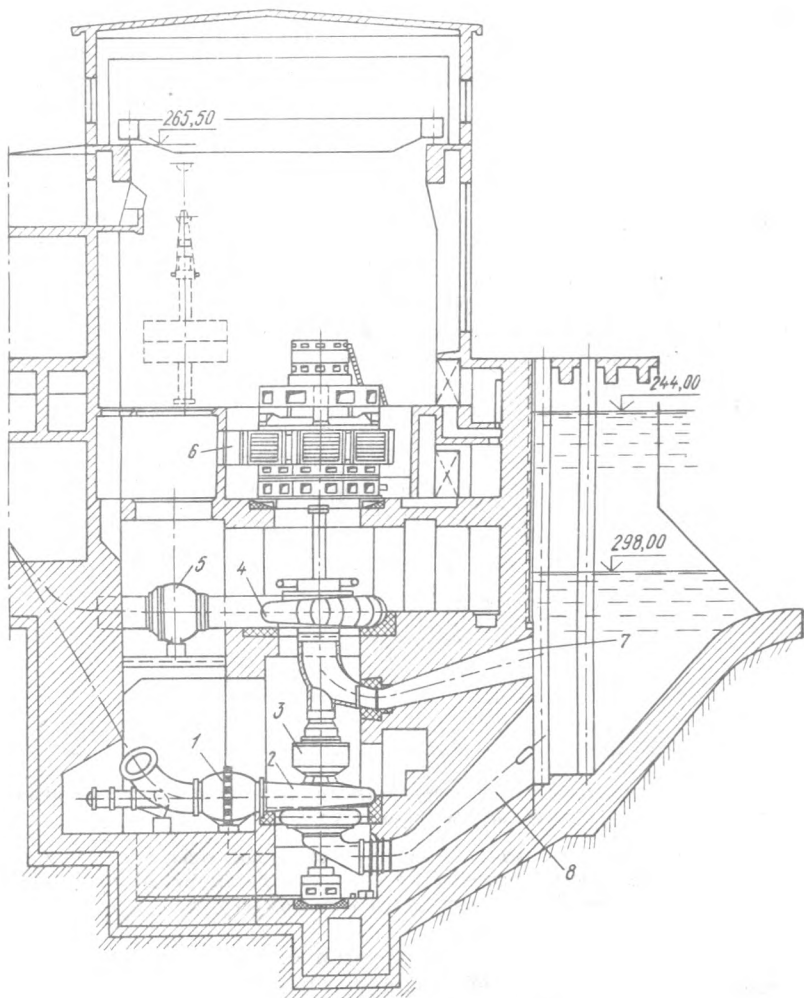


Рис. 40. Здание гидроаккумулирующей электростанции, выполненное по двухмашинной схеме с вертикальными агрегатами (поперечный разрез здания Загорской ГАЭС):

1 — обратимая гидромашина; 2 — реверсивная электрическая машина (гидрогенератор-двигатель); 3 — мостовой кран; 4 — трансформатор; 5 — служебно-производственный корпус; 6 — козловой кран; 7 — паз ремонтных заграждений; 8 — решетка

связи с этим выявляется необходимость в строительстве гидроаккумулирующих электростанций.

ГАЭС помогает решить ряд актуальных для энергосистем задач.

1. ГАЭС, работающая обычно в двухтактном режиме и выполняющая роль потребителя-регулятора, повышает коэффициент использования мощности ТЭС и обеспечивает более равномерный режим их работы, что, в свою очередь, повышает экономичность и надежность работы теплового оборудования (например, систематическое уменьшение мощности ТЭС на 20 % снижает срок службы оборудования на 15...20 %). В тех случаях, когда ГАЭС заряжается при сравнительно низких удельных расходах топлива (догрузка агрегатов ТЭС и АЭС в часы ночного провала нагрузки), участие ГАЭС в балансе мощности систем может привести даже к экономии топлива.

2. Высокая маневренность оборудования ГАЭС (скорость набора нагрузки для агрегатов ГАЭС в турбинном режиме обычно оценивают в 25 % и более от их мощности в 1 мин против 8 %, допускаемых для пиковых ТЭС) позволяет использовать их в оперативном многократном "подхвате" нагрузки. Пуск обратимых агрегатов ГАЭС из нерабочего состояния в турбинный режим с набором полной нагрузки составляет 2 мин, пуск в насосный режим из нерабочего состояния – 5...6 мин, а время перевода из турбинного в насосный режим – 8...10 мин.

3. Наличие у ГАЭС широкого регулировочного диапазона нагрузки и аккумулирующего бассейна позволяет очень эффективно использовать их в качестве первоочередного аварийного резерва системы.

4. Агрегаты ГАЭС используют для выработки реактивной мощности в режиме синхронного компенсатора с целью улучшения  $\cos \varphi$  системы, регулирования напряжения, снижения потерь энергии в электрических сетях.

5. Строительство ГАЭС при существующих ГЭС значительно повышает мощность и регулирующие возможности системы.

6. ГАЭС могут эффективно выступать в качестве участника ВХК, когда строительство ГЭС экономически не оправдывается из-за малого естественного притока.

Сооружения ГАЭС ограничиваются топографическими, геологическими, гидрологическими и экономическими условиями.

Большинство ГАЭС становятся экономически выгодными при напорах 100...300 м. Напоры отдельных ГАЭС с подземными бассейнами могут достигать 1200...1500 м и более.

Расчетные затраты не превышают, как правило, 75...80 % затрат на газотурбинные или другие специальные маневренные тепловые электростанции, которые в проектах рассматривают в качестве заменяемых вариантов.

Первая ГАЭС в бывшем СССР – Кубанская (мощность 19 МВт в 6 агрегатах, напоры 14,5...30 м) с сезонным циклом аккумулярования была построена в 1969 г. в головной части Большого Ставропольского канала. В 1970 г. была введена в эксплуатацию Киевская ГАЭС ( $N =$

= 230 МВт,  $H_{\text{ср}} = 65$  м) суточного цикла аккумуляирования, в качестве нижнего бассейна ГАЭС используется водохранилище Киевской ГЭС.

При проектировании ГАЭС расчетами определяют энергию заряда и разряда, напоры и объемы водохранилища.

При работе в турбинном режиме напор на гидромашине меньше статического за счет гидравлических потерь в водоводах (см. рис. 38, а). При работе в насосном режиме развиваемый напор больше статического за счет гидравлических потерь при обратном движении воды в водоводах.

Установив на расчетном графике суточной нагрузки желательную зону работы ГАЭС, можно вычислить необходимый полезный объем ( $\text{м}^3$ ) каждого из бассейнов ГАЭС:

$$W_{\text{пол}} = 367,2 \mathcal{E} / (H \eta_t \eta_g), \quad (47)$$

где  $\mathcal{E}$ ,  $H$ ,  $\eta_t$ ,  $\eta_g$  — соответственно расчетная суточная выработка энергии ГАЭС, средний напор, КПД турбины и генератора.

Таким образом ГАЭС, используя замкнутый водооборотный цикл и работая в периоды дешевой электроэнергии, является электростанцией, рационально использующей водные ресурсы.

Помимо рассматриваемых выше энергетических факторов гидроаккумуляирования важное значение имеют также потери энергии при ее преобразовании из электрической в механическую и потенциальную энергию поднятой воды, а затем снова в электроэнергию. Показателем потерь энергии при гидроаккумуляировании является коэффициент полезного действия  $\eta_{\text{ГАЭС}}$ , который определяется произведением КПД трансформатора, гидравлической и электрической машин, водоводов при работе в насосном и турбинном режимах. Для современных ГАЭС с крупными обратимыми агрегатами и одинаковой частотой вращения  $\eta_{\text{ГАЭС}} = 75\%$  и более.

Рассмотрим основные отрицательные воздействия водоемов ГАЭС на окружающую среду и способы для уменьшения этих воздействий.

Ущерб сельскохозяйственному производству наносится в основном изъятием сельскохозяйственных угодий, поэтому при выборе площадок под ГАЭС рассматривают варианты размещения объектов с учетом возможного уменьшения площади изымаемых земель. Для уменьшения ущерба сельскохозяйственному производству предусматривают мероприятия по рекультивации земель, снятию плодородного слоя и улучшению качества малопродуктивных земель, борьбе с подтоплением.

ГАЭС влияет и на рыбопродуктивность водоемов: возможна гибель зоопланктона и гидробионтов при прохождении через агрегаты и ухудшение условий зимовки рыб в нижних водоемах при изменении режимов работы ГАЭС.

Установлено положительное влияние ГАЭС на качество воды в водоемах как при использовании существующих водохранилищ, так и при образовании искусственных водоемов. При интенсивном ежесу-

точном перемешивании больших масс воды происходит ее насыщение кислородом, что повышает способность воды к самоочищению за счет интенсификации процессов окисления. Усиленная циркуляция воды замедляет развитие синезеленых водорослей. Учитывая, что водозаборы ГАЭС, как правило, находятся на достаточно больших глубинах, при работе станции в турбинном режиме взмучивание воды в верхних слоях водоема несущественно.

В верхних водоемах ГАЭС ледовый режим формируется в условиях глубоких и частых колебаний уровней. В средней части водоема ледяной покров образуется в конце осени и постепенно нарастает в течение зимы. На периодически осушаемых берегах водоема формируются призмы льда слоистой структуры. Ледяной покров средней части водоема отделен от береговых зон майной, заполненной крошевым льдом. Кратковременность периода, в течение которого вода поступает в водоем с большими скоростями, приводит к образованию лишь небольшого количества шуги, которая перемещается потоком воды в водоеме и вследствие особенностей температурного режима в нем не оказывает отрицательного влияния на сооружения.

Использование в технологической схеме ГАЭС двух создаваемых или одного крупного существующего водохранилища различно влияет на термический режим водоемов. В осенне-зимний период при работе ГАЭС в турбинном режиме температура воды в обоих бьефах несколько понижается. При работе ГАЭС в насосном режиме температура воды в верхнем бьефе повышается, в чем и проявляется влияние крупного нижнего водоема.

#### **9.4.10. Требования гидроэнергетики к качеству воды**

Вода, используемая для гидроэнергетики, должна обеспечивать долговечность оборудования и отвечать стандартам агрессивности и мутности. Она не должна вызывать коррозии металла, абразивный износ гидравлических турбин, разрушение бетона, биологических обрастаний.

Абразивный износ зависит от концентрации наносов в водном потоке, длительности воздействия насыщенного наносами потока на проточную часть гидротурбины, твердости, формы и размеров частиц наносов. Реальную опасность в речной воде представляют не все взвешенные наносы, а только те их частицы, твердость которых превышает твердость материалов, идущих на изготовление проточной части турбин. Последние обычно делают из углеродистой стали, твердость которой (по шкале Мооса) равна 5...5,5. Истирающая способность наносов зависит от состава и среднегодовой концентрации в воде. Концентрацию окатанных кварцевых песчинок диаметром  $d = 0,5$  мм при длительности воздействия на детали проточной части турбины  $T = 87\ 604$  сут называют приведенной.

Кроме того, на сооружения и машины может оказывать влияние

кислотность воды. Водородный показатель в водохранилищах для гидроэнергетики как участка ВХК не должен превышать 6...10.

#### **9.4.11. Путь экономии водных ресурсов в гидроэнергетике**

ГЭС благодаря специфическим свойствам используемых ими природных водных ресурсов и техническим особенностям их технологического оборудования отличаются от тепловых и атомных электростанций: работа ГЭС в значительной степени зависит от природных условий (от водности рек в данное время, наличия наносов и льда и т. п.); режим работы ГЭС связан с режимом водопотребления и использования других отраслей народного хозяйства. Перечисленные особенности усложняют организацию рационального использования ГЭС в энергосистемах в первую очередь из-за неопределенности планирования работы ГЭС и их водохранилищ вследствие изменчивости гидрологического режима водотока.

В соответствии с энергетическими функциями ГЭС требуется сохранять регулируемую способность водохранилищ, рационально управлять режимами уровня при регулировании стока или обеспечить возможность такого управления.

Рациональное использование водных ресурсов на действующих ВХК, в состав которых входит ГЭС, позволяет получать дополнительную электроэнергию и, следовательно, снижать расходы топлива на тепловых электростанциях. Увеличение выработки электроэнергии ГЭС, а следовательно, экономия водных ресурсов могут быть достигнуты за счет организационных и технических мероприятий, направленных:

на улучшение среднесуточного КПД (т. е. уменьшение потерь в результате суточного регулирования нагрузки на ГЭС, потерь КПД за счет абразивного и кавитационного износа гидротурбин, потерь КПД в результате отклонения фактической комбинаторной зависимости для турбин ПЛ от оптимальной);

снижение потерь напора, в частности, в подводящих сооружениях: каналах, трубопроводах, в турбинных водоводах, на сороудерживающих турбинных решетках;

уменьшение потерь расхода (на фильтрацию через сооружения и в обход их, через направляющий аппарат гидротурбин остановленных и резервных, на холостой ход агрегатов, на шлюзование или обеспечение работы рыбоходных и рыбопропускных сооружений, за счет сброса воды через плотину или водосбросы).

### **9.5. Промышленность**

В системе водного хозяйства промышленность выступает как один из крупнейших потребителей воды, предъявляющих различные требо-

вания к ее количеству и качеству. Вода приобретает всевозрастающее влияние, так как она является одним из элементов производственного процесса, несущим разнообразные функции, а также в ряде случаев таким же сырьем, как уголь, железо и другие полезные ископаемые.

Для промышленного водопотребления характерны: большие объемы водопотребления и водоотведения; незначительный процент безвозвратного водопотребления; значительная зависимость водозабора от технологии производства и системы водоснабжения; разнообразие функций использования воды; равномерность потребления воды в течение года; высокий удельный вес в загрязнении источников воды.

**Особенности промышленного водопотребления.** Промышленность – один из наиболее ответственных потребителей, требующих высокой надежности подачи воды. Расчетная обеспеченность водоподачи для промышленности составляет 95...97 % (по числу бесперебойных лет).

Промышленное водоснабжение базируется в основном на использовании речного стока. Следовательно, высокую надежность водоснабжения может обеспечить только регулирование стока. Поэтому промышленность – это участник крупнейших водохозяйственных комплексов бассейнов Волги, Днепра, Дона, сибирских рек и т. д. В маловодных районах с ограниченными запасами поверхностных вод для обеспечения водой промышленных центров построены каналы по переброске стока Северский Донец – Донбасс, Днепр – Кривой Рог, Днепр – Донбасс, Иртыш – Караганда, которые являются крупными комплексными сооружениями, используемыми и для других целей.

Водоохранилища комплексных гидроузлов кроме промышленного водоснабжения используют: для полного водообеспечения из верхнего бьефа, а также из нижнего бьефа (путем специальных пусковок); подпитки оборотного водоснабжения; охлаждения теплых вод; разбавления сточных вод.

Требования промышленного водоснабжения к *режиму уровней* водохранилищ комплексных гидроузлов аналогичны требованиям коммунально-бытового водоснабжения.

При использовании водохранилища для охлаждения теплых вод необходимо создание достаточных зон охлаждения, и прежде всего достаточной площади зеркала водохранилища, так как вода в водохранилище охлаждается главным образом за счет испарения ее с водной поверхности.

Влияние промышленности на других участников ВХК и на окружающую среду. Промышленные стоки ухудшают качество воды в водохранилище. По экспертным оценкам, около двух третей загрязняющих воду веществ попадают в нее с промышленными стоками. Большой удельный вес в загрязнении воды имеют сточные воды предприятий нефтехимической, металлургической, целлюлозно-бумажной, пищевой промышленности.

Вид загрязнения зависит от функции воды, применяемой в про-

мышленности. При использовании воды как теплоносителя происходит ее механическое и термическое загрязнение, как среды для поглощения и транспортирования механических и растворенных примесей – химическое загрязнение.

Сложно влияние сброса теплых вод в комплексное водохранилище: положительное влияние заключается в удлинении периода навигации, улучшении условий рекреации, рыбоводства, ускорении развития растений, повышении урожая; при орошении отрицательное влияние особенно сказывается в южных районах страны – повышается температура воды в водохранилище и усиливаются процессы эвтрофирования, цветения воды в результате интенсивного развития синезеленых водорослей, появляются туманы. Все это отрицательно сказывается на качестве воды, ухудшает рекреационные условия водохранилищ, оказывает негативное воздействие на рыбное хозяйство. Для большинства рыб повышение температуры воды выше 30 °С губительно. Поэтому в соответствии с нормативными документами температура воды в водохранилище в результате сброса сточных вод не должна превышать естественную максимальную летнюю температуру более чем на 3 °С, зимнюю – более чем на 5 °С.

В каждом водохранилище необходимо оценить комплекс положительных и отрицательных влияний сброса теплых вод и найти методы нейтрализации вредного воздействия и использования положительного.

Для уменьшения вредного воздействия сточных вод необходимо совершенствование методов очистки. Однако даже очень большие затраты на строительство все более совершенных очистных сооружений не обеспечивают полную охрану окружающей среды от негативного влияния промышленных стоков. Поэтому более перспективно уменьшение водоотведения, а следовательно, и уменьшение загрязнения объектов воды.

**Требования к качеству и количеству воды.** Требования промышленного производства к качеству воды разнообразны. Они зависят от функции воды в производстве (рис. 41).

Вода, используемая для хозяйственно-бытовых нужд работающих на производстве, должна соответствовать нормативным требованиям, предъявляемым к качеству воды в коммунально-бытовом хозяйстве, а для технических нужд – прежде всего быть безвредной для здоровья работающих.

От качества воды, используемой в производстве, зависят качество продукции, долговечность оборудования и т. д. Наиболее высокие требования предъявляют к воде, служащей технологическим сырьем и входящей в состав выпускаемой продукции. Эти требования регламентируются в зависимости от вида продукции. Вода для других целей должна отвечать стандартам жесткости, накипеобразования, вспенивания, агрессивности и т. п. Наименьшие требования можно предъявить к воде, используемой для охлаждения и гидротранспорта.

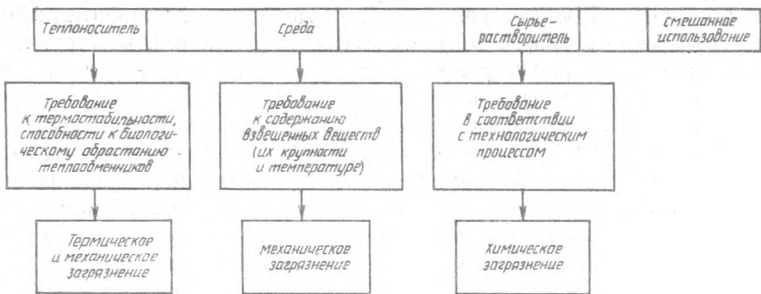


Рис. 41. Назначение, основные требования к качеству и виды загрязнений воды, используемой в промышленном производстве

Она не должна вызывать коррозии металла, разрушения бетона, биологических обрастаний охладителей.

Водное хозяйство промышленных предприятий предназначено для удовлетворения технологических нужд производства и бытовых потребностей в воде его работников и состоит из комплекса водохозяйственных установок для водоподготовки, использования воды, очистки сточных вод и водоотведения.

Объем воды, необходимый для нормальной деятельности предприятий, определяется:

характером использования воды. В производственном процессе используют как сырье, растворитель, теплоноситель и среду, поглощающую и транспортирующую механические и растворенные примеси.

Наибольшее количество воды, используемой в промышленности, требуется для охлаждения. Например, в теплоэнергетике около 85 % общего расхода воды предназначается для охлаждения масла, воздуха и конденсации отработанного пара. Аналогично и на металлургических заводах.

Большие объемы воды расходуются для гидравлического транспорта. Например, в горнодобывающей промышленности это основная функция воды.

Кроме технологических нужд в промышленном производстве воду используют для удовлетворения хозяйственно-бытовых потребностей работающего персонала, уборки производственных помещений, полива зеленых насаждений, обеспечения противопожарной безопасности; объемом и видом выпускаемой продукции. В зависимости от вида выпускаемой продукции удельное водопотребление (на единицу продукции) может изменяться от нескольких единиц до нескольких тысяч кубических метров (см. с. 6);

принятой технологией производства. Например, на химических предприятиях, выпускающих одну и ту же продукцию, в зависимости от технологии производства удельные расходы воды различаются в 5...10 раз;



системой промышленного водоснабжения. На объемы воды, используемые в промышленности, большое влияние оказывают схемы промышленного водоснабжения.

*Безвозвратное водопотребление* в промышленности состоит из объема воды, вошедшего в состав продукции; потерь воды в процессе водоподготовки и в водопроводящей сети, производства, очистки и охлаждения; объема загрязненных стоков, которые подлежат уничтожению (выпариваются, сжигаются или закачиваются в подземные изолированные горизонты).

Объем безвозвратного водопотребления зависит от функции воды в промышленности и системы водоснабжения. Так, при добыче нефти воду используют для закачки в пласты и при этом она безвозвратно теряется. Поэтому в нефтедобывающей промышленности объемы безвозвратного потребления составляют около 50 % полного водопотребления. В промышленности строительных материалов безвозвратное потребление воды также составляет 50 % общего потребления свежей воды. Три четверти объема безвозвратного водопотребления входит в состав продукции. Наименьшие потери воды отмечены при использовании ее для охлаждения. Например, на тепловых электростанциях объем потерь составляет примерно 1 %.

Безвозвратные потери в системе оборотного водоснабжения (при использовании воды для охлаждения) несколько больше, чем при прямоточном. Дополнительные потери – это потери на испарение, фильтрацию и капельный унос из открытых оборотных систем. Удельные безвозвратные потери в промышленности в зависимости от системы водоснабжения колеблются от 2 (при прямоточной системе) до 12 % (при оборотной).

*Водоотведение* характеризуется объемом сбрасываемых сточных вод. Водоотведение в основном зависит от схемы водоснабжения.

При прямоточном водоснабжении объемы водоотведения равны объемам полного водопотребления, за исключением объемов воды на безвозвратное водопотребление, и достигают больших величин. Необходимо учитывать также объемы воды, которые нужны для разбавления очищенных стоков. В целом по промышленности кратность разбавления может колебаться в пределах 8...10 с отклонениями по разным экономическим районам в зависимости от состава отраслей. Разбавлять стоки можно в водохранилище либо в нижнем бьефе гидроузлов, для чего необходимы выпуски воды из водохранилища.

При оборотной системе водоснабжения объемы сточных вод существенно меньше, поскольку водоотведение включает объемы воды, используемой на продувку системы, или только объемы воды, необходимые для "освежения" воды.

При повторной схеме водоснабжения количество сбросных вод также меньше, чем при прямоточном водоснабжении предприятий, включенных в цикл повторного водоснабжения, так как водоотведение включает только сбросные воды последнего звена.

Объемы сбросов зависят и от технологии промышленного производства и сокращаются при ее усовершенствовании.

Таким образом, при оборотном водоснабжении потери воды больше, а объемы сбросных вод меньше, чем при прямоточном. Однако при этом превышение потерь гораздо менее значительное, чем снижение объемов сточных вод. Поэтому объемы потребляемой свежей воды при оборотном водоснабжении во много раз меньше, чем при прямоточном. Например, при оборотной системе водоснабжения для выработки 1 т стали необходимо забирать из источника в 10 раз меньше свежей воды, 1 т каучука – в 12, 1 т медной руды – в 20 раз меньше, чем при прямоточной системе водоснабжения.

Поэтому в практику введены такие показатели, как коэффициент оборотного водоснабжения  $K_{об}$  и кратность использования воды  $n$ , характеризующие эффективность системы промышленного водоснабжения. Вычисляют их для отдельного предприятия, отдельной отрасли или района. На передовых предприятиях  $K_{об} = 0,95...0,97$ . Например, на Рязанском нефтеперерабатывающем заводе 97 % используемой воды находится в замкнутом цикле оборотного водоснабжения ( $K_{об} = 0,97$ ). Если рассматривать совершенство системы водоснабжения по отраслям, то наиболее рационально используют воду в нефтехимической и химической отраслях, в черной металлургии, где кратность использования воды равна 4,5...6,5.

**Оценка эффективности различных систем водоснабжения.** Эффективность различных систем водоснабжения можно оценить сравнением относительных затрат воды при разных схемах водоснабжения. Обычно воду после очистки сбрасывают в водный источник. Для нормального прохождения биологических процессов самоочищения в водоеме, т. е. охраны экологической системы водоема, сточные воды необходимо разбавлять. При этом  $K_{разб} = 5...100$ . Различные схемы водоснабжения с учетом природоохранных функций представлены на рисунке 42.

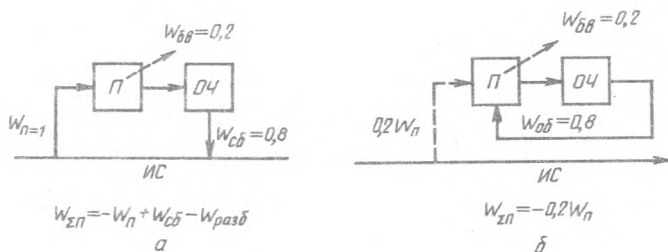


Рис. 42. Расчетные схемы определения эффективности систем водоснабжения:

а – прямоточная; б – оборотная; ИС – источник; П – потребитель; ОЧ – очистные сооружения

Суммарная потребность в воде с учетом объемов на разбавление  $W_{\text{разб}}$  при прямоточной системе водопотребления

$$W_{\text{прям}} = -W_{\text{п}} + W_{\text{сб}} - W_{\text{разб}} = -W_{\text{п}} + W_{\text{сб}} - K_{\text{разб}} W_{\text{сб}}, \quad (48)$$

где  $W_{\text{п}}$  — относительное водопотребление;  $W_{\text{сб}}$  — относительная величина возвратных вод;  $W_{\text{разб}}$  — объемы воды, необходимые для разбавления сточных вод.

При  $W_{\text{п}} = 1$ ,  $W_{\text{сб}} = 0,8$  и  $K_{\text{разб}} = 10$

$$W_{\text{прям}} = -1 + 0,8 - 10 \cdot 0,8 = -8,2.$$

Знак минус показывает, что это расходная часть водохозяйственного баланса.

В идеальных оборотных системах сбросы отсутствуют, поэтому  $W_{\text{сб}} = 0$  и, следовательно,  $W_{\text{разб}}^{\text{об}} = 0$ , водопотребление расходуется на подпитывание и примерно равно безвозвратному  $W_{\text{бв}}$ , которое составляет 20...30 %  $W_{\text{п}}$ .

Суммарная потребность в воде при оборотной системе водоснабжения при  $W_{\text{разб}} = 0$

$$W_{\Sigma \text{п}}^{\text{оборот}} = -W_{\text{п}}^{\text{об}} + W_{\text{сб}}^{\text{об}} = -1 + 0,8 - 0,2. \quad (49)$$

Таким образом, оборотная система водоснабжения эффективнее прямоточной:

$$K_{\text{эф}} = W_{\Sigma \text{п}}^{\text{прям}} / W_{\Sigma \text{п}}^{\text{обор}} = 8,2 / 0,2 = 41 \text{ раз}. \quad (50)$$

Аналогичный расчет для повторной схемы показывает, что она эффективнее прямоточной. Например, для двух потребителей  $П_1$  и  $П_2$  при  $W_{\text{п}2}^{\text{прям}} = 0,8 W_{\text{п}1}^{\text{прям}}$

$$K_{\text{эф}} = \frac{(-W_{\text{п}1}^{\text{прям}} + W_{\text{сб}1}^{\text{прям}} - W_{\text{разб}1}^{\text{прям}}) + (-W_{\text{п}2}^{\text{прям}} + W_{\text{сб}2}^{\text{прям}} - W_{\text{разб}2}^{\text{прям}})}{-W_{\text{п}1}^{\text{прям}} + W_{\text{сб}2}^{\text{прям}} - W_{\text{разб}2}^{\text{прям}}}. \quad (51)$$

При  $K_{\text{разб}} = 10$  для обоих потребителей

$$K_{\text{эф}} = \frac{(-1 + 0,8 - 8) + (-1 + 0,8 - 8)}{-1 + 0,8 - 8} = 2.$$

Аналогичные расчеты для комбинированной схемы показывают, что ее эффективность  $K_{\text{эф}} = 16,4$ .

**Экономия потребления воды в промышленности.** Уменьшение объема сточных вод возможно при оборотном и повторном водоснабжении. Эти системы водоснабжения — элементы безотходной технологии, а следовательно, рационального использования ресурсов и бережного отношения к природе. Рациональной считают такую систему хозяйствования, при которой исключаются или существенно снижаются сброс загрязняющих веществ в водоемы, отравление атмосферы

вредными газами, извлечение ценных веществ из отходов. Например, использование сточных вод гидролизно-дрожжевых заводов. Зимой очищенные сточные воды предприятия используют в оборотном водоснабжении завода, а летом часть их после биологической очистки направляют на поля для орошения. Осадки сточных вод из первичных отстойников передают на цементный завод, а активный ил из вторичных отстойников используют при производстве белково-витаминного кормового продукта. Такая технология позволяет использовать отходы и экономить свежую воду.

При создании замкнутых систем водного хозяйства промышленных предприятий водоподготовку и очистку сточных вод рассматривают как единую систему. Для того чтобы осадки перерабатывать в полезную продукцию, необходимо одновременное проектирование основного производства и систем водного хозяйства. В зависимости от технологической схемы получения продукции предусматривают последовательное использование воды, поскольку разные циклы требуют воду разного качества. Так, воду первоначально можно использовать в технологических целях, затем, после необходимой очистки, — в системе охлаждения, а потом без очистки — в качестве транспортного средства или вновь в технологическом цикле после прохождения глубокой очистки.

При использовании очищенных промышленных и городских сточных вод в системах охлаждения необходимо предусмотреть безопасность работы с ними. Для этого необходимо добиваться возможно меньшего уноса капельной влаги из градирен с помощью соответствующих конструкций водоуловителей.

Большое значение имеет предотвращение биологического обрастания труб в оборотных системах, для чего применяют периодическое хлорирование или озонирование.

Для подпитки систем оборотного водоснабжения могут быть использованы ливневые стоки, для чего в состав системы водного хозяйства промышленного предприятия включают устройства для их сбора и очистки.

При внедрении систем оборотного и повторного водоснабжения сохраняется необходимость очистки сточных вод. Однако в большинстве случаев степень их очистки может быть значительно ниже, чем при сбросе в водоемы. Концентрация отдельных компонентов в оборотной воде может во много раз, в зависимости от технологии использования воды, превышать ПДК их в водоемах. Поэтому создание водооборотных циклов, при которых резко снижаются потребление свежей воды и сброс сточных вод, сокращает капитальные вложения и эксплуатационные расходы на объекты водоснабжения и канализации (на водоподготовку и водоотведение).

Таким образом, применение бессточных технологий — один из путей эконсмии свежей воды в промышленности. В этом случае получают дополнительный экономический эффект за счет использования

ценных веществ, извлеченных из сточных вод, а также благодаря более эффективной системе водного хозяйства. Внедрение бессточных технологий устраняет загрязнение водоемов сточными водами. Исчезает необходимость разбавления сточных вод, для которого требуются значительные объемы воды.

Перспективно также внедрение в производство технологических процессов, не требующих воды или использующих ее в небольших количествах. Все больше водяное охлаждение заменяют воздушным. Например, при замене водяного охлаждения на воздушное расход воды сокращается более чем в 3 раза.

Находят применение и другие охлаждающие среды, например для охлаждения ядерных реакторов используют различные газы, конденсированные пары натрия и т. п.

Вода может быть исключена из системы охлаждения при совмещении технологических процессов, в одном из которых тепло выделяется, а в другом поглощается (например, при химических реакциях), при технологических процессах в неводной среде.

Однако надо иметь в виду, что при внедрении новых технологических способов могут вместо одних загрязнений появиться другие, не менее опасные. Так, замена водяного охлаждения воздушным может привести к загрязнению воздушной среды. Поэтому более перспективно внедрение бессточных технологий.

Для промышленных целей рационально использование не только очищенных городских сточных вод, но и морских вод в прибрежных районах. Причем наиболее перспективно повторное использование морских вод, например, для охлаждения, а затем для закачки горячей воды в пласт (при нефтеподаче), при котором значительно экономятся вода и средства.

Снизить расходы воды, используемой в промышленности, можно, совершенствуя очистку сточных вод, т. е. уменьшая объем воды, необходимый для разбавления сточных вод, так как кратность разбавления стоков зависит от качества очистки. Сточные воды сложного состава, для которых не найдены надежные и экономически приемлемые методы очистки, могут быть уничтожены различными способами. Однако и в этом случае необходимо предусмотреть охрану природных комплексов, чтобы один вид загрязнения не заменить другим. Загрязнения могут не поступать непосредственно в открытые водоемы, но попадать в подземные воды, например, при захоронении продуктов сжигания отходов производства или непосредственном захоронении ядовитых сточных вод в глубокие подземные горизонты.

Большое значение имеют разработка научно обоснованных норм водопотребления и водоотведения, а также соблюдение технологической дисциплины.

Стимулом для снижения норм водопотребления, внедрения прогрессивных технологий и систем водоснабжения послужило введение с 1982 г. платы за воду.

## 9.6. Рыбное хозяйство

**Рыбное хозяйство в условиях комплексного использования водных ресурсов.** Рыбная продукция составляет существенную долю в обеспечении питания населения земного шара. Основную часть рыбы (около 80...100 млн т в год) добывают в открытых морях и водах океана. Морепродукты дают человечеству почти 20 % потребляемого животного белка.

Годовая добыча рыбы в бывшем СССР достигала 10 млн т в год, из них около 90 % в открытых морях.

Внутренние моря, реки, озера, водохранилища России богаты ихтиофауной, как ни в одной другой стране. В них воспроизводится более 90 % мировых запасов осетровых и более 60 % лососевых.

*Осетровые* породы рыб (осетр, белуга, севрюга, стерлядь, калуга, шип, лопатонос), а также *лососевые* (лосось, горбуша, кета, семга, белорыбица, кижуч и др.) – проходные. Они нагуливаются в море, а для размножения заходят в реки, поднимаясь для нереста на сотни и тысячи километров до каменистых гряд и перекатов с незаиленным дном.

*Частиковые* породы рыб (вобла, тарань, судак, сазан, лещ, жерех, рыбец и др.) – полупроходные. Они нагуливаются также в море, озере, водохранилище, а для размножения заходят в дельты рек и пойменные системы, периодически затопливаемые в период весеннего половодья.

Рыбы, ведущие оседлую жизнь, называют туводными (жилыми). К ним относят окунь, щуку, карася, линя и др.

*Пресноводных* рыб разделяют на реофильных, или речных, обитающих в проточном русле, и на лимнофильных, или озерных, приспособившихся к жизни в спокойной воде озер и водохранилищ.

**Требования к количеству и качеству водных ресурсов.** При регулировании рек каскадами водохранилищ условия воспроизводства рыб, особенно проходных и полупроходных, резко изменяются. Препятствуют пути миграции их на нерестилища и обратно при скате рыбной молоди в месте нагула, сокращаются ареалы обитания и площади нерестилищ в верхних бьефах, изменяются температурные и уровенные режимы нижних бьефов, усыхают дельтовые протоки, сокращаются паводковые расходы, обеспечивающие обводнение нерестилищ в низовьях рек для полупроходных рыб. Рыба очень требовательна к качеству воды. Даже относительно небольшие залповые сбросы неочищенных вод предприятий пищевой, химической и другой промышленности, животноводческих комплексов, а также смывы удобрений и ядохимикатов с полей или мест их хранения часто приводят к массовой гибели рыбы. Последняя очень чувствительна к радиоактивному загрязнению воды. Радиоактивные вещества накапливаются в растениях и мелких гидробионтах. Поглощая их, рыбы накапливают в себе радиоактивные вещества до опасных концентраций.

Губительно действует на рыбу и кислородная недостаточность воды, вызванная окислением органики, поступающей со сточными водами или в результате интенсивного развития, а затем отмирания синезеленых водорослей и высшей водной растительности.

При резком сокращении поступления пресной воды во внутренние моря и водоемы снижаются уровни и ареалы обитания рыб, повышается соленость. Все это снижает воспроизводство зоопланктона — основы кормовой базы рыб и рыбопродуктивность водоемов.

В комплекс мер по дальнейшему развитию рыбоводства и увеличению вылова рыбы в пресноводных водоемах, развитию естественно-го и искусственного воспроизводства ценных промысловых рыб должны входить мероприятия по сохранению естественного воспроизводства и разведению рыб в рыбоводных заводах и нерестово-выростных хозяйствах. Организация промысла при этом должна обеспечивать сохранение генетически разнообразного и многовозрастного рыбного стада, так как только такая структура нерестовых популяций обеспечивает получение наиболее полноценной и жизнестойкой молодежи. Для сохранения естественного воспроизводства проходных и полупроходных рыб необходим пропуск через гидроузлы производителей, идущих на нерест, и обратный скат молодежи в места нагула. Для этого водозаборные сооружения и другие опасные места во всех случаях должны быть оборудованы рыбозащитными и направляющими устройствами.

Для создания благоприятных условий обитания в прудах, водоемах, на нерестилищах и путях миграции рыбы осуществляют паводковые пуски воды из водохранилищ для регулирования водного, солевого и гидробиологического режимов морей и озер. Для этого требуется около 9 км<sup>3</sup> воды в год, а в перспективе — до 20 км<sup>3</sup> в год.

**Водохранилища и рыбное хозяйство.** Создание водохранилищ дает новые огромные водные пространства, которые могут и должны использоваться для разведения рыбы. Однако для этого еще при строительстве необходимо провести специальные рыбохозяйственные мероприятия: расчистку ложа водохранилища от леса и кустарника, мелиорацию нерестилищ, строительство рыбоводных заводов и пр.

Строительство водохранилищ на реках резко изменяет ихтиологические условия. Вместо быстротекущих рек образуются слабопроточные водоемы, изменяются уровенные и температурные режимы. Это приводит к смене видового состава рыб. Ценные "аборигены" исчезают, сменяясь преимущественно "сорной" рыбой. Например, из водохранилища Красноярской ГЭС исчезли осетр, таймень, стерлядь, хариус, ленок. Поэтому необходимо заранее прогнозировать будущую рыбохозяйственную обстановку водохранилища, создавать рыбоводные заводы для заселения водоема ценными промысловыми рыбами с самого начала его заполнения. Сейчас в сводных сметах каждого крупного гидроузла обязательно предусматривают средства на строительство рыбозаводов.

Большинство построенных водохранилищ имеет низкую рыбопродуктивность (6...20 кг/га). Наиболее рыбопродуктивны Цимлянское и Кременчугское водохранилища.

**Прудовое и садковое рыборазведение**\*. Внутренние пресноводные водоемы также должны давать много рыбной продукции, причем наиболее ценной по вкусовым качествам. Поэтому большое значение придадут искусственным рыбоводным предприятиям: рыбопитомникам для получения посадочного материала и нагульным прудам.

Прудовое рыбное хозяйство имеет очень высокую продуктивность, примерно в 100 раз выше, чем в естественных водоемах и водохранилищах. В искусственных водоемах создают наиболее благоприятные гидробиологические условия и искусственное кормление рыб. Кстати, продуктивность кормов в рыбном хозяйстве выше, чем в животноводстве.

Кормят рыб в основном гранулированными кормами сухого прессования. В них входят жмых, мушкетная сметка, рыбная, костная и мясо-костная мука, зерновые и бобовые злаки, обеспечивающие получение полноценной жизнестойкой молоди как в естественных условиях, так и на рыбоводных заводах. Как было показано выше, на эти цели затрачиваются ежегодно достаточно большие объемы водных ресурсов — десятки кубических километров, хотя в естественных условиях эти величины значительно больше. Оптимально управлять объемами воды для рыбного хозяйства можно посредством рыбопропускных сооружений.

Рыбопропускные сооружения разделяют по способу перемещения рыб из нижнего бьефа в верхний: на *рыбоходы*, в которых рыбы перемещаются благодаря их активному движению на всем протяжении рыбопропускного устройства, и *рыбоподъемники*, в которых рыба не затрачивает собственной энергии на преодоление напора.

Рыбоходы выполняют или в виде лотков и обводных каналов с одинаковой скоростью потока по всей длине рыбопропускного сооружения, ограниченной с помощью усиленной шероховатости до величин, доступных для преодоления их рыбой, или в виде отдельных прудков, соединенных каналами, или лестниц, образованных поперечными перегородками, в которых скорость потока по длине сооружения неодинакова. В этих рыбоходах рыба после отдельных бросков имеет возможность отдохнуть в тиховодных участках.

Устройство рыбоходов целесообразно на гидроузлах с небольшими напорами, поскольку продвижение по ним связано со значительными затратами физических сил, что отрицательно влияет на способность рыб-мигрантов к размножению. К продвижению по рыбоходам наиболее приспособлены лососевые породы рыб, которые преодолевают скорости до 3 м/с, осетровые — лишь до 1,2...1,5, а частиковые — до 0,6...1,2 м/с.

---

\* Раздел написан совместно с С. А. Федоровым.



К рыбободъемникам относятся рыбопропускные шлюзы, гидравлические и механические подъемники, а также мобильные плавучие установки. Эти сооружения имеют дополнительные устройства с подсветкой (ихтиологические площадки), позволяющие контролировать перемещение рыб, их видовой состав и численность.

*Рыбопропускной шлюз* по принципу работы аналогичен судоходному, но в отличие от последнего он снабжен специальными устройствами для управления движением рыб: блоком питания, создающим привлекающий поток воды в нижнем бьефе, лотком-рыбонакопителем, побудительными сетками для перевода рыб из рыбонакопителя в рабочую камеру и из нее в верхний бьеф. Примером такого типа сооружений является рыбопропускной шлюз, построенный в 1969 г. на Кочетовском гидроузле (р. Дон), предназначенный для пропуска на нерест ценных проходных и полупроходных рыб. Рыбопропускные шлюзы аналогичной конструкции построены на Николаевском (р. Дон) и Федоровском (р. Кубань) гидроузлах и на водodelителе в дельте р. Волги.

Устройство рыбопропускных шлюзов целесообразно на гидроузлах с напорами до 15...20 м. Они более экономно, чем рыбоходы, расходуют водные ресурсы, так как средние удельные расходы у них меньше.

Эффективность работы любого рыбoreгулятора связана прежде всего с непрерывностью привлечения рыбы в сооружение, в том числе и в период шлюзования в рабочей камере, а также с экологической безопасностью рыбы, попадающей в него или находящейся в нижнем бьефе гидроузла. Разрабатываются конструкции, сочетающие достоинства рассмотренных выше типов сооружений с экологическими требованиями охраны природы. Так, Новочеркасским инженерно-мелиоративным институтом (НИМИ) предложен для условий низконапорных гидроузлов с перепадом бьефов до 3 м шлюз-рыбоход с затворами переменной сквозности, конструкция которого практически обеспечивает постоянство привлекающих рыбу скоростей потока в широком диапазоне изменения перепадов уровней бьефов и создает благоприятные условия для одновременного пропуска всех видов рыбных мигрантов в обоих направлениях. При этом значительно (до 10...20 мин против 2...3 ч в существующих конструкциях сооружений) сокращается задержка рыбы и уменьшается длина рыбоходного тракта. Пропускную способность шлюза регулируют совместной работой затворов радиального типа, состоящих из перфорированных в шахматном порядке (0,5...1,5 м) отверстий створа, соединенных по дну железобетонного листка шарниром (рис. 43).

Лепестковые створки в сложенном виде – это обычный затвор, а в раскрытом пропускают воду всем живым сечением потока без водоворотных зон.

Пока прикрытый верхний затвор обеспечивает перепад бьефов и пропуск заданного транзитного расхода, нижний открыт и работает в

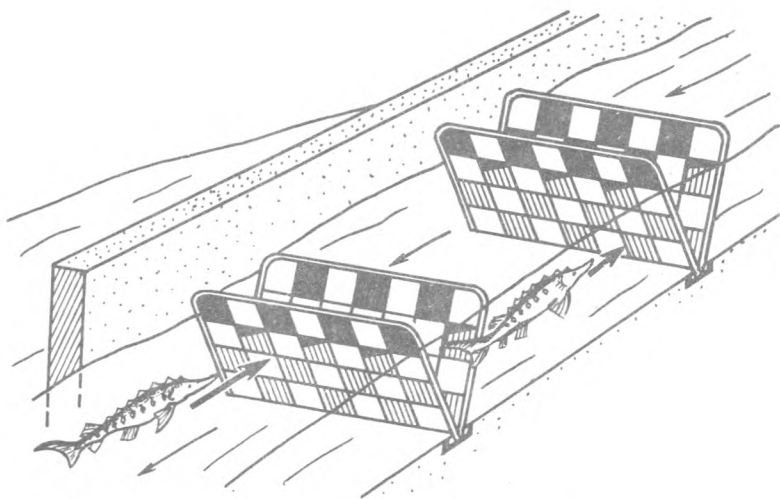


Рис. 43. Шлюз-рыбоход с радиальными затворами переменной сквозности конструкции НИМИ

режиме пропуска рыбы. Затем для поддержания перепада уровней воды прикрывают нижний затвор и открывают верхний, выпуская рыбу через его отверстия. При малом перепаде уровней воды между бьефами шлюз работает в режиме рыбохода и его затворы постоянно раскрыты.

На средненапорных гидроузлах устраивают гидравлические и механические рыбоподъемники.

*Гидравлический рыбоподъемник* работает как рыбопропускной шлюз, но рабочая камера расположена вертикально в виде шахты, что при значительных напорах более рационально. В этом случае рыба, переведенная из рыбонакопителя в рабочую камеру после наполнения последней водой, поднимается горизонтальным сетчатым побудительным устройством до уровня дна верхового выходного лотка и затем вертикальным побудительным устройством выводится в верхний бьеф. Гидравлические рыбоподъемники сооружены на Волжской ГЭС и на Цимлянском гидроузле (1952 г.), оба с напором 26 м.

На Волжском гидроузле в качестве блока питания использованы гидравлические турбинные агрегаты соответствующей пропускной способности, позволяющие использовать пропускаемую воду для выработки электроэнергии. С целью непрерывной работы рыбоподъемника его выполняют двухкамерным, поэтому в период шлюзования в одной камере другая открыта для привлечения и накопления рыбы.

Волжский рыбоподъемник пропускает около 10 % подошедшей к гидроузлу рыбы, что достаточно для ее естественного воспроизводства.

В механическом рыбоподъемнике рыбу из нижнего бьефа в верхний перемещают с помощью козлового крана в наполненном водой контейнере, в который рыбу переводят из рыбонакопителя с помощью побудительного устройства. Механические рыбоподъемники построены на Саратовской ГЭС и Краснодарском гидроузле. Рыбоподъемник Краснодарского гидроузла позволяет не только пропускать производителей, идущих на нерест, но и скатывающуюся из верхнего бьефа в нижний рыбу и молодь, для чего блок питания делают в виде водослива с водобойным колодцем, которые рассчитаны и сконструированы с учетом безопасного ската рыб. Достоинство механических рыбоподъемников – отсутствие шлюзовой камеры со сложным процессом маневрирования рабочими затворами. Конструкция рыбопропускных сооружений рассмотрена в специальной литературе, например в книге Гидротехнические сооружения (1978).

Размещение рыбопропускных сооружений в створе гидроузла – одна из сложных задач, так как предсказать поведение рыбы в нижнем бьефе и места ее концентрации перед сооружением, особенно в условиях изменяющихся режимов гидроузла, трудно.

Трассы движения и места концентрации осетровых рыб в нижнем бьефе Волжской ГЭС, зафиксированные с помощью ультразвуковых меток-передатчиков, устанавливаемых на рыбах, показаны на рисунке 44. На рисунке видно, что рыба концентрируется перед гидроузлом в трех точках и заходит в подходящий канал судоходного шлюза.

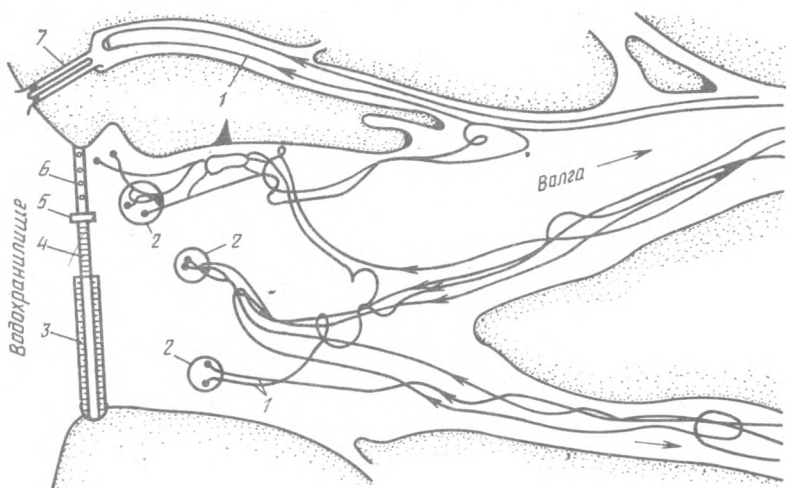


Рис. 44. Трассы движения и места концентрации осетровых рыб в нижнем бьефе Волжской ГЭС:

1 – трасса движения меченых рыб; 2 – места концентрации меченых рыб; 3, 4 – грунтовая и водосливная плотины; 5 – рыбоподъемник; 6 – здание ГЭС; 7 – судоходный шлюз

Поэтому в гидроузлах необходимо устройство нескольких рыбопропускных сооружений в сочетании с направляющими рыбозаградителями, расположенными в отводящем русле гидроузла. Для пропуска рыбы на гидроузлах возможно и целесообразно использовать судоходные шлюзы, которые установлены благоприятно по отношению к миграционному пути рыб. Для обеспечения эффективности такого пропуска необходимо создание транзитного потока воды через шлюз в периоды между шлюзованием судов, а при необходимости – установка направляющих рыбозаградителей и специальное шлюзование для пропуска только рыб, особенно в ночное время.

При проектировании гидроузлов рыбопропускные сооружения являются основными, поскольку влияют на выбор створа и компоновку сооружений гидроузла.

При выборе места для рыбопропускного сооружения учитывают естественное стремление рыб двигаться на нерест против течения, поэтому необходимо выделить привлекающий поток, исходящий из рыбонакопителя, в общем потоке гидроузла от ГЭС и плотины. При этом скорость (табл. 8) в привлекающем шлейфе должна отличаться от спутных потоков не менее чем на 0,2 м/с и быть не меньше пороговых (минимальных, при которых у рыб появляется реакция на поток) и не больше сносящих (при которых рыб сносит потоком).

#### 8. Скорости потока, принимаемые при проектировании рыбопропускных сооружений

| Вид рыбы       | Скорость потока, м/с |              |             |
|----------------|----------------------|--------------|-------------|
|                | пороговая            | привлекающая | сносящая    |
| Осетровые:     |                      |              |             |
| взрослые особи | 0,15...0,2           | 0,6...0,9    | 0,9...1,2   |
| молодь         | —                    | —            | 0,15...0,2  |
| Лососевые:     |                      |              |             |
| взрослые особи | 0,2...0,25           | 0,8...1      | 1,1...1,6   |
| молодь         | —                    | —            | 0,25...0,35 |
| Частиковые:    |                      |              |             |
| взрослые особи | 0,15...0,2           | 0,5...0,7    | 0,9...1,2   |
| молодь         | —                    | —            | 0,15...0,25 |

Сложность выбора места стационарного рыбопропускного сооружения в гидроузле привела к созданию *мобильной плавучей установки*, размещаемой ниже гидроузла, в местах наибольшей концентрации рыб. Такая установка состоит из плавучего лотка-накопителя с побудительными и сопрягающими устройствами, ихтиологической площадки и контейнера для перевозки рыбы. Здесь накопленную в рыбонакопителе рыбу сначала с помощью лотка-накопителя, а затем сопрягающего устройства переводят на ихтиологическую площадку для учета, а затем в самоходный контейнер, в котором ее транспортируют через

судоходные шлюзы в верхний бьеф. Затраты водных ресурсов при этом минимальны и связаны с расходами на заполнение шлюзовых камер.

Плавающие установки периодически меняют свое местоположение, приспособляясь к различным режимам работы гидроузла. Применение их особенно целесообразно на гидроузлах с пиковыми ГЭС. В период пиковых нагрузок скорости потока в нижнем бьефе могут оказаться недопустимыми для прохода рыбы к плотине, при остановке же агрегатов и пропуске только санитарных расходов ориентированный поток выражен слишком слабо. В этом случае привлечение и накопление рыбы целесообразно вдали от гидроузла. При каскадном расположении гидроузлов в ряде случаев целесообразно возводить рыбопропускные сооружения только на нижнем гидроузле, а затем транспортировать накопленных производителей через весь каскад в самоходных плавучих контейнерах с системой жизнеобеспечения, предусматривающей обогащение воды кислородом, заданные температурные режимы и создание в рабочей камере контейнера ориентирующий поток, который, поддерживая упорядоченную ориентацию рыбы, уменьшает ее механическое травмирование. Последние контейнеры перевозят автомобилями или по железной дороге. Подобное решение принято, например, для каскада гидроузлов на р. Амударье.

При проектировании рыбопропускных комплексов следует учитывать, что воздействие целесообразно лишь в том случае, если после строительства гидроузла естественные нерестилища выше гидроузла сохраняются, или возможно строительство искусственных нерестилищ, размещение на нерестилищах такого числа производителей рыб, которое необходимо для сохранения стада, и имеются условия для роста и развития молоди рыб; обеспечены условия для ската молоди и производителей рыб через сооружения гидроузла.

На энергетических гидроузлах в целях экономии воды рыбохозяйственные попуски для затопления нерестилищ сокращают, что приводит к высыханию нерестилищ и гибели икры. В этом случае целесообразно ниже гидроузла строительство невысокой плотины, поддерживающей необходимый уровень за весь период нереста и выклева рыбной молоди. Например, Волжский вододелитель, построенный в дельте Волги в 1977 г., состоит из глухой бетонной перегородивающей плотины, сооруженной в 50 км выше Астрахани, но ниже вершины дельты Волги с 33 обычными пролетами для пропуска воды и 2 судоходными шириной по 110 м, перекрываемыми опускающимися металлическими затворами высотой 12 м. От плотины вниз по течению возведена земляная дамба длиной 85 км, высотой до 6 м, расположенная по гребню водораздела между западной и восточной частями дельты.

Цель строительства вододелителя – в условиях дефицита стока поддерживать в системе рукава Бузан естественные условия обводнения дельты. При снижении расхода воды реки ниже 12...14 тыс. м<sup>3</sup> вододелитель должен обеспечивать гарантированную подачу (не менее

8...9 тыс. м<sup>3</sup>) в восточную часть дельты. К сожалению, вододелитель практически не работает (из-за противоречий между рыбным и сельским хозяйством).

Одновременно со строительством вододелителя проводят мелиорацию естественных нерестилищ, прочистку протоков, планировку лугов, создают удобные водоемы для роста мальков и ската их в море.

**Скат рыб к местам нагула и рыбозащитные сооружения.** Покатная миграция молоди, как и проход производителей на нерест, — важный этап жизненного цикла многих рыб. Особое значение она имеет для проходных и полупроходных рыб с длинными путями миграции, у которых нерестилища и места нагула расположены в различных гидробиологических зонах. Покатную миграцию наблюдают и у туводных (жилых) рыб, она помогает пространственному распределению молоди по ареалу обитания.

По характеру покатные перемещения рыб разделяют на *пассивные*, при которых рыбы сносятся течением в неориентированном по отношению к потоку состоянии, *активные*, когда рыба активно движется вниз по потоку, и *активно-пассивные*, в этом случае рыбы ориентированы головой против течения и, слабо сопротивляясь ему, сносятся потоком.

Наиболее характерен для большинства рыб пассивный скат рыб в состоянии предличинок, личинок и мальков (с длиной тела 6...15 мм).

Распределение покатных рыб в потоке во времени и пространстве зависит от их вида, фазы развития, времени суток, сезона и гидравлических характеристик потока.

Скат молоди приурочен к определенному сезону, в который происходит размножение рыб. Наиболее интенсивно он проявляется в весенне-летний период. В зависимости от термического и гидрологического режимов сроки покатной миграции могут значительно сдвигаться.

В суточном цикле скат молоди происходит в основном в сумеречно-ночной период. В светлое время суток мальки реагируют на течение воды, поэтому держатся обычно против него. У молоди большинства костистых рыб основной механизм ориентации в потоке — зрительный (оптомоторная реакция), поэтому по мере снижения освещенности их реакция ослабевает и они сносятся течением. В мутных потоках оптомоторная реакция рыб не проявляется и суточная динамика ската почти не связана с освещенностью.

В отличие от костистых рыб у молоди осетровых ведущий механизм ориентации в потоке тактильный (ощущение прикосновения), поэтому суточный цикл их ската мало зависит от освещенности и их отрыв от дна в большей степени связан с суточной ритмикой выклева личинок и вертикальной миграцией их кормовых организмов.

Таким образом, суточная динамика покатной миграции определяется главным образом прекращением ориентации молоди в потоке (зрительной или тактильной) или невозможностью личинок сопротивляться существующим в реке скоростям течения.

Пространственное распределение покатной молоди зависит от вида рыб и степени их развития. У костистых рыб ранние личинки располагаются у поверхности, поздние – в поверхностном слое и в толще, мальки – в толще и в придонном уровне, т. е. по мере роста молодь все больше предпочитает придонные уровни. Покатная молодь осетровых на всех периодах развития распределяется в основном в придонном слое.

Вертикальное распределение скатывающейся молоди зависит также от ее плавучести, фотореакции, вертикального распределения кормовых организмов и гидравлических особенностей потока. Так, на изгибе русла вследствие поперечной циркуляции потока пассивный скат рыбной молоди происходит по винтовой линии, при этом основная масса ее концентрируется у вогнутого берега.

Знание временного и пространственного распределения покатной молоди позволяет использовать эти закономерности при отборах воды из рек на нужды народного хозяйства и существенно сократить гибель рыб.

Так, следует избегать забора воды вблизи нерестилищ и у вогнутого берега русла, ограничить работу водозаборов в ночное время, располагать оголовки водозаборов по глубине потока в зонах с наименьшей концентрацией рыб.

Вообще, обеспечение обратного ската рыбной молоди и производительей, особенно на зарегулированных реках, связано с большими трудностями. Особенно губительны проходы рыб через высоконапорные гидроузлы. В водосбросных трактах вследствие больших скоростей потока рыба получает механические повреждения, а при прохождении через турбинные тракты еще и барические травмы, связанные с резким перепадом давления в турбинах – от положительного в несколько десятков метров до вакуума. Следует отметить, что такой перепад давления также травмирует зоо- и фитопланктон, что ухудшает кормовую базу в нижнем бьефе гидроузла.

В период ската рыб происходит также их массовая гибель от недостатка кормов, поедания хищниками, завлечения в водозаборы, от судорожства.

В этих условиях во все большей степени для воспроизводства рыбы необходимо искусственное разведение молоди для последующего выпуска в водоем.

Немаловажное значение в воспроизводстве рыбной продукции при значительных разборах воды из рек на нужды мелиорации имеет рыбохозяйственное использование водоемов оросительных систем.

Значительный ущерб рыбному хозяйству наносят водозаборные сооружения, не оборудованные рыбозащитными устройствами. Крупные насосные станции оросительных систем засасывают вместе с водой огромное количество рыбной молоди.

*Рыбозащитные сооружения* предупреждают попадание рыб в опасные для них зоны гидроузлов и в различные водозаборы. По

своему действию на рыб различают следующие основные виды рыбозащитных сооружений:

экранные рыбозаградители, не пропускающие рыбу: жалюзи, сетчатые, фильтрующие;

физиологические, отпугивающие или направляющие рыбу: электрические, пневматические, зрительно-световые, звуковые;

рыбоотводящие (инженерно-экологические): каналы, располагаемые в местах наибольшей концентрации рыб, отводящие рыбу за пределы опасных зон;

рыбоотгораживающие (экологические), использующие поведение (размещение в потоке) рыб различного вида и в разное время: запаны, зонные ограждения (стационарные или перемещающиеся), зонтичные оголовки водозаборов, глубинные водозаборы, поверхностные водозаборы.

Наиболее эффективны рыбозащитные сооружения, препятствующие попаданию в водозаборы ранней молодежи рыб, пассивно перемещающейся с потоком, — сетчатые и фильтрующие рыбозаградители.

Иногда эффективны экологические способы защиты рыбной молодежи, требующие менее сложных устройств. Физиологические рыбозащитные устройства, а также жалюзи, целесообразны для защиты взрослых особей и поздней молодежи, реагирующих на различные раздражители и факторы.

Сетчатые рыбозаградители получили наибольшее распространение, так как могут полностью предотвращать попадание рыб в водозаборы. Размеры отверстий ячеек сетчатого полотна зависят от размеров защищаемых рыб:

|                       |       |    |    |    |    |    |    |    |
|-----------------------|-------|----|----|----|----|----|----|----|
| Диаметр отверстий, мм | 2     | 3  | 4  | 6  | 7  | 8  | 9  | 10 |
| Длина тела рыб, мм    | До 10 | 20 | 30 | 40 | 50 | 60 | 70 | 90 |

При квадратных отверстиях (ячейках сетки) указанные размеры соответствуют диагонали ячейки.

При использовании сетчатых рыбозаградителей необходимо решить следующие сложные задачи.

1. Для обеспечения жизнеспособности задерживаемой рыбы последняя должна без касания проходить вдоль сетчатого полотна к рыбоотводящему тракту. Для этого фронт полотна располагают под острым углом к потоку, обеспечивая малые скорости фильтрации воды через сетку, которая должна составлять не более половины сносящей скорости для защищаемых рыб (см. табл. 8).

Для уменьшения вероятности касания рыбы с сеткой длина пути вдоль сетчатого полотна не должна превышать 5...10 м. Этим зачастую лимитируют размеры рыбозаградителей. Малые скорости потока через сетку требуют больших площадей сетчатого полотна. Поэтому их применение на крупных водозаборах затруднено, а малая прочность полотна не позволяет использовать их для предотвращения попадания рыбы в опасные зоны гидроузлов.



2. Мелкое сетчатое полотно быстро забивается мусором, и его необходимо очищать. Для этого применяют струйные устройства, выполняемые в виде перфорированных труб (флейт), которые располагают с тыльной стороны сетчатого полотна, нагнетая воду под высоким давлением. В период очистки флейта перемещается вдоль сетки (в плоских сетках) или сетка движется около неподвижной флейты (конусный рыбозаградитель). В новых конструкциях самоочищающихся заградителей, в которых сетчатое полотно в процессе работы разворачивают обратной стороной к потоку, обеспечивается смыв мусора (рыбозаградители с наклонно движущейся сеткой с центральным рыбоотводом турникетного типа).

3. В большинстве случаев сетчатые рыбозаградители требуют возврата задержанной рыбы в водоем на достаточно большое расстояние от водозабора. Наиболее просто эту задачу можно решить с помощью открытого канала со скоростями не ниже сносных, но для этого необходимо рыбу, поступающую в рыбоотвод рыбозащитного сооружения, поднять на 2...3 м в голову отводного канала.

В качестве рыбоподъемников потенциально могут служить тихоходные осевые и центробежные насосы, объемные насосы, эжекторы, лифты и эрлифты. Однако большинство из них не изучено и не проверено на практике в отношении возможного травмирования рыб.

## 9.7. Водный транспорт

Водный транспорт имеет большое значение в развитии народного хозяйства. Хотя объем перевозок внутренним водным транспортом невелик (около 5%), себестоимость перевозок на магистральных реках на 35 % ниже железнодорожных и в 3...5 раз – автомобильных. При этом первоначальные затраты на организацию судоходства по крупным рекам почти в 10 раз меньше соответствующих затрат на создание железных дорог. Годовой объем перевозок внутренним транспортом страны превышает 600 млн т.

Общая протяженность внутренних водных путей бывшего СССР составляла почти 146 тыс. км. Протяженность искусственных водных путей более 20 тыс. км. В связи с созданием гидроузлов комплексного назначения на реках Волге, Каме, Днепре, Дону и др. появилась возможность использовать крупнотоннажные суда типа река–море, что значительно повысило эффективность использования водного транспорта.

В результате проведенных работ по благоустройству рек и строительству ряда каналов создана единая глубоководная водно-транспортная система, связавшая пять морей: Балтийское, Белое, Каспийское, Черное и Азовское. При этом было решено водоснабжение, орошение и т. д. для целых регионов.

Особое значение водный транспорт имеет для развития хозяйства восточных районов России, являясь иногда единственным видом

транспорта. Речники обслуживают промышленность, сельское хозяйство, нефтяные и газовые промыслы Западной Сибири. Поэтому необходимо укрепление материально-технической базы отрасли, и прежде всего перевозок грузов в районах Сибири, Дальнего Востока и Севера. Учитывая большую перегрузку железных дорог летом, нужно максимально переключить, где это целесообразно, перевозку грузов с железнодорожного транспорта на речной.

Важную роль во внутренних и особенно внешнеторговых перевозках имеет морской транспорт. На его долю приходилось около 80 % международного грузооборота бывшего СССР. Более половины их объема занимают наливные грузы (главным образом сырая нефть).

**Особенности водного транспорта как участника ВХК. Требования к водным объектам.** Влияние на участников ВХК и окружающую среду. Водный транспорт относится к водопользователям, которые, используя водные объекты как среду, не изымают из них воду. Вместе с тем водный транспорт – серьезный источник загрязнения водных ресурсов. Так, если общее количество нефти, попадающей за год в Мировой океан, оценивается в 5...10 млн т, то на долю морского транспорта приходится 1...1,5 млн т, речного транспорта (включая приморские города) – 1,9 млн т. Особую тревогу вызывает загрязнение морей и океанов в результате аварий судов и танкеров. При аварии современного танкера в океан может быть выброшено до 300 тыс. т нефти. Из 1 млрд т нефтепродуктов, ежегодно перевозимых морским транспортом, теряется не менее 0,1 % (до 1 млн т) нефти, которая, покрывая пленкой воду, значительно снижает теплообмен океана и атмосферы, интенсивность света в воде на 90...99 %. Загрязнение водоемов приводит к серьезным противоречиям между водным транспортом и другими участниками ВХК (коммунально-бытовым, промышленным водоснабжением, рекреацией, рыбным хозяйством, сельскохозяйственным орошением). Имеются противоречия между водным транспортом и гидроэнергетикой. Так, при шлюзовании и осуществлении судоходных попусков изымаются значительные объемы воды из водохранилища, уменьшается напор на гидроузлах.

Водопотребление ( $m^3$ ) на шлюзование можно определить по формуле

$$W = Vn, \quad (52)$$

где  $V$  – объем шлюзовой камеры,  $m^3$ ;  $n$  – число шлюзований за рассматриваемый период времени.

Потери в выработке электроэнергии ( $kВт \cdot ч$ )

$$\mathcal{E} = (WH\eta_a)/367, \quad (53)$$

где  $H$  – напор гидроузла, м;  $\eta_a$  – КПД агрегатов ГЭС.

Отмечены отрицательные влияния водного транспорта и на окружающую среду, а кроме того, разрушение берегов и нерестилищ рыб от волн, создаваемых судами.

Требования к объектам водного транспорта определяются его особенностями как участника ВХК. Прежде всего это необходимость поддержания в верхнем и нижнем бьефах гидроузла судоходных (гарантированных) глубин, зависящих от категории водного пути (табл. 9).

9. Глубины (м) водных путей в зависимости от их категории

| Глубина судового хода                      | Категория водного пути  |                    |                              |                          |
|--|-------------------------|--------------------|------------------------------|--------------------------|
|  | I (сверх-магистральной) | II (магистральной) | III (пути местного значения) | IV (пути на малых реках) |
| Минимальная гарантированная                | > 2                     | 1...2,6            | 0,6...1,4                    | 0,45...0,8               |
| Используемая флотом в среднем за навигацию | > 3                     | 1,65...3           | 1...1,65                     | ≤ 1                      |

На зарегулированных реках требуемые глубины поддерживают специальными пусками. Поэтому для поддержания нормальных условий при плавании судов в нижнем бьефе на гидроузлах нежелательно проводить суточное регулирование стока. На реках с удаленными друг от друга гидроузлами и на незарегулированных судоходные глубины обеспечивают с помощью дноуглубительных работ.

Среди других требований водного транспорта к водным объектам можно выделить ограничение скорости течения на водном пути (из условия обеспечения движения судов вверх по течению) и ограничение колебаний уровней воды у причальных сооружений.

К качеству водных ресурсов водный транспорт практически не предъявляет никаких требований.

**Пути повышения эффективности использования водного транспорта при комплексном использовании водных ресурсов.** Опыт развития отрасли показывает, что дополнительные затраты на комплексные гидроузлы, связанные с созданием необходимых условий для использования водного транспорта, эффективны только тогда, когда сооружают глубоководные большой протяженности водные пути. Практика водохозяйственного строительства показывает также, что устройство шлюзов на гидроузлах комплексного назначения для пропуска судов целесообразно лишь при напорах менее 40...50 м. При больших напорах необходимо создавать судоподъемники или краны (для скоростных судов). Так, на Красноярском гидроузле ( $H = 101$  м), используемом в целях гидроэнергетики и водного транспорта, построен наклонный судоподъемник.

Повышению эффективности водного транспорта при комплексном использовании водных ресурсов способствует создание каскада низконапорных гидроузлов, повышающих уровень в пределах русла без значительных затоплений береговых зон.

Большой эффект дают также дноуглубительные работы, применение судов с малой осадкой и хорошими судоходными качествами для плавания в условиях рек и водохранилищ или судов типа река – море.

### **9.8. Лесосплав. Требования к водным объектам. Влияние на участников ВХК и окружающую среду**

Сплав леса по воде имеет важное хозяйственное значение. Это наиболее простой и самый дешевый вид транспорта леса. Отметим, что этому способствует в первую очередь расположение районов промышленной вырубki леса – недалеко от водных путей в бассейнах рек Северной Двины, Печоры, Онеги, Оби, Енисея, Лены, Амура. Кроме того, в ряде районов заготовления древесины другие виды транспорта неразвиты и их организация потребует значительных капитальных вложений. В бывшем СССР по водным путям транспортировалось около 40 % общего объема вывоза леса. Лесосплав осуществлялся более чем по 2000 рек, озерам, крупным водохранилищам.

Водный транспорт леса разделяют на лесосплав и перевозки леса в судах. В свою очередь, лесосплав делят на молевой, кошельный и плотовый.

*Молевой лесосплав* – сплав не связанных между собой бревен. Применяют его на несудоходных реках и в верховьях судоходных рек. До недавнего времени в молевой лесосплав поступало 47 % общего объема сплава леса. Молевой сплав при своей простоте имеет существенные недостатки: велики потери транспортируемой древесины; большой ущерб наносится рыбному хозяйству вследствие изменения естественного режима реки; затонувшие бревна и кора засоряют русло и естественные нерестилища рыб, а при их разложении уменьшается содержание кислорода в воде и выделяются вещества, отравляющие воду, разрушаются берега, вследствие чего заиляются русла и загрязняются воды поверхностными стоками. При этом использование водотоков в интересах коммунально-бытового хозяйства, промышленности, рекреации требует дополнительных затрат, связанных с очисткой воды.

*Кошельный лесосплав* – сплав не связанных между собой бревен в кошелях – плавающих ограждениях (чаще всего из тех же бревен). Применяют на несудоходных реках, небольших озерах и водохранилищах. Кошели транспортируют катера с небольшой скоростью. Этот способ несколько снижает потери древесины и другие отрицательные последствия сплава леса россыпью по воде. Кошельный сплав не исключает потерь леса в результате подныривания бревен под плавающие ограждения. Эти потери увеличиваются с ростом волнения. При транспортировании леса на расстояния свыше 20 км применение кошельного сплава должно быть обосновано технико-экономическими расчетами.

*Плотовый лесосплав* – транспорт леса по водным путям в плотках.

Применяют на средних и крупных судоходных реках, озерах и водохранилищах. При таком способе лесосплава увеличивается сплавопропускная способность рек, практически исключаются потери древесины.

Для транспортирования леса по зарегулированным рекам требуется устройство специальных лесопропускных сооружений. При молевом сплаве леса используют бревнопуски – узкие лотки прямоугольного или трапециoidalного сечения, оборудованные затворами, при плотовом – судоходные или специальные плотошлюзы.

Судовые перевозки – водный транспорт леса в самоходных судах (лесовозах) или буксируемых несамоходных баржах, встречаются на крупных озерах, морях, зарегулированных участках рек.

Дальнейшее развитие лесосплава должно идти по пути отказа от молевого сплава прежде всего на реках, имеющих рыбохозяйственное значение. Пополнение речного флота судами для перевозок леса создает предпосылки для развития судовых перевозок в первую очередь по озерам и водохранилищам. Это не только улучшит экологическую обстановку в водоемах, но и будет способствовать улучшению качества древесины.

Создание глубоководных магистралей, по которым можно транспортировать древесину в крупных плотам и судах, значительно повышает эффективность лесосплава.

### **9.9. Сельскохозяйственное водоснабжение и обводнение**

Сельскохозяйственное водоснабжение обеспечивает хозяйственно-бытовые потребности в воде сельских населенных пунктов, полевых станов, животноводческих ферм и комплексов машинно-тракторного парка.

Водоснабжение сельских населенных пунктов (по сравнению с коммунально-бытовым водоснабжением в городах) имеет следующие особенности:

- большая часовая неравномерность;
- значительные объемы безвозвратного водопотребления (из-за меньшего применения канализации);
- меньшее удельное водопотребление.

С ростом благоустройства сельских населенных пунктов эти различия будут сглаживаться. Если по прогнозам за период с 1950 по 2000 г. полное водопотребление возрастет более чем в 6 раз, то безвозвратное потребление увеличится лишь в 3 раза, т. е. в процентном отношении в 2000 г. оно будет в 2 раза меньше, чем в 1950 г.

Нормы потребления воды определяются нормативными документами.

В животноводстве водопотребление зависит от вида поголовья, условий его содержания, технической оснащенности ферм.

Наибольшим потребителем воды является животноводческий

комплекс – крупное специализированное сельскохозяйственное предприятие по производству продукции на базе индустриальной технологии. Здесь воду расходуют на физиологические (например, поение скота), технологические и на вспомогательные нужды (кормоцехи, объекты ветеринарно-санитарного обслуживания животных и административно-бытовые здания). В нормах предусмотрен усредненный расход воды отдельно на каждый вид потребления для каждой группы животных с учетом мощности комплекса, технологии содержания животных и способа уборки навоза (механический или гидравлический). Последний фактор влияет на объем потребляемой воды. Поэтому норма потребления воды на технологические нужды может увеличиться до 3,5 раза. Нормы потребления воды животными зависят от их вида и колеблются от 200 (коровы) до 2 л (молодняк овец) на одну голову в сутки (Нормы, 1982).

Сточные воды промышленных животноводческих комплексов разделяют на хозяйственно-бытовые, производственные и жидкий навоз, объемы которых зависят от принятой технологии производства, мощности комплекса и степени его благоустройства. При большом количестве животных в комплексах образуются значительные объемы сточных вод, сильно загрязненных органическими веществами и, следовательно, содержащих большое количество удобрений. Эффективным средством их утилизации является орошение кормовых культур на прифермских полях орошения, что снижает опасность загрязнения водных ресурсов, доочищает их в почвенном слое и улучшает условия создания кормовой базы.

При использовании сточных вод для орошения необходимо предусмотреть санитарную охрану почв, грунтовых вод и водных источников. Использование животноводческих стоков возможно только после соответствующей технологической водоподготовки.

Наиболее высокие требования к санитарному качеству сточных вод предъявляют при дождевании, а подпочвенное орошение требует наибольшей степени осветления стоков.

Требования к качеству воды, используемой в сельскохозяйственном водоснабжении, зависят от вида потребления. Наиболее высокие требования предъявляют к питьевой воде.

Вода, используемая для нужд животноводства, в основном должна удовлетворять тем же требованиям, что и для хозяйственно-питьевых. Качество воды в определенной степени влияет на продуктивность животноводства. Поение скота загрязненной водой может привести к снижению продуктивности на 40...70 %. В то же время по некоторым показателям (цветность, прозрачность, запах) требования к воде, используемой для животных, могут быть несколько снижены. Допустимую минерализацию воды определяют по ее вкусовым качествам, а температура ее должна по возможности быть 8...15 °С.

Для полива приусадебных участков и эксплуатации машинно-тракторного парка воды может быть менее высокого качества.

В южных районах России животноводство обеспечивается кормовыми ресурсами естественных обширных пастбищ, которые имеют ограниченные водные ресурсы, поэтому нуждаются в *обводнении*. Особенность этого вида водоснабжения – сезонность и разбросанность точек водопотребления. В систему мероприятий по обводнению пастбищ входит устройство сети артезианских скважин (при наличии достаточных запасов подземных вод), подача воды по водопроводу или оросительно-обводнительным каналам (например, Иртыш–Караганда). Центрами пастбищного водоснабжения являются водопойные пункты, расстояния между которыми определяются радиусом водопоя.

Экономии воды в сельскохозяйственном водоснабжении и обводнении можно добиться:

внедряя централизованное водоснабжение сельских населенных пунктов (уменьшение доли безвозвратного водопотребления);

борьбой с утечками воды (из трубопроводов, при переливах через водопойные корыта и водонапорные башни и т. д.);

организацией рационального режима поения животных;

применением менее водоемких технологий на животноводческих комплексах (например, при удалении навоза);

оборудованием фонтанирующих скважин на водопойных пунктах краново-регулирующими устройствами.

### 9.10. Рекреация

Частью водного хозяйства является использование водных ресурсов для целей рекреации, т. е. для отдыха и лечения населения, водного спорта. Рекреация получает все большее значение в связи с повышением уровня жизни народа, увеличением свободного времени, ростом урбанизации. В организации полноценного отдыха и лечения особое значение имеют реки и водоемы. Вода, являясь одним из компонентов природной среды, необходима человеку не только для решения экономических задач, но и для сохранения и восстановления его здоровья, для улучшения настроения и т. д. Поэтому большую часть рекреационных учреждений располагают либо непосредственно на берегах водоемов, либо вблизи от них. Водоемы являются центрами кратковременного отдыха населения. На отдаленных от города водоемах организуют длительный отдых, лечение, спортивное рыболовство и т. п. Поэтому рекреация очень часто включается в состав участников ВХК и ее требования учитывают так же, как и других участников.

С созданием водохранилищ рекреационная ценность природного комплекса обычно возрастает. Увеличивается также и его рекреационная вместимость (количество отдыхающих) из-за увеличения длины береговой линии и площади акватории. Улучшаются климатические условия района и особенно сильно в южных сухих, где уменьшается сухость воздуха и снижается жара. Обширные водные пространства оказывают благотворное психологическое воздействие.

Благодаря наличию при строительстве комплексных гидроузлов базы стройиндустрии и квалифицированных кадров рекреационные объекты (гостиницы, турбазы, кемпинги и пр.) могут быть построены в более короткие сроки. Для рекреации можно также использовать освобождающиеся поселки строителей комплексного гидроузла. В этом случае уже имеются подъездные пути в зону отдыха.

С созданием водохранилища появляются более благоприятные условия для занятий водными видами спорта: греблей, парусным спортом, водным туризмом.

Однако не на всех водохранилищах комплексных гидроузлов возможна организация рекреационных комплексов, так как включение рекреации, предъявляющей определенные требования к уровенным режимам, качеству воды в водохранилищах, в состав участников ВХК требует определения рекреационной ценности создаваемого водохранилища, которая характеризуется следующими факторами:

- типом ландшафта;
- формой, глубиной и площадью водоема, уклоном берегов, наличием пляжей;
- богатством водной фауны, типом прибрежной растительности;
- температурой воды, продолжительностью комфортных дней;
- качеством воды, чистотой прибрежной территории;
- наличием природных и исторических памятников;
- удаленностью от крупных городов, обеспеченностью транспортом и подъездными путями.

Оценка рекреационных факторов приведена в таблице 10.

При строительстве водохранилищ надо помнить и об отрицательных последствиях для рекреации: затопление и подтопление существующих минеральных источников, памятников архитектуры; ухудшение в некоторых случаях условий отдыха из-за резких колебаний уровня воды в водохранилище при регулировании стока; интенсивная переработка берегов на крупных водохранилищах; цветение воды, возможное заболачивание прибрежной территории и т. д.

**Требования к количеству, качеству воды и уровенным режимам в водохранилище.** Рекреация на водоемах выступает в основном как водопользователь. Как водопотребитель рекреация использует воду для питьевого водоснабжения и других коммунальных нужд отдыхающих и спортсменов.

Нормы потребления воды для различных рекреационных учреждений на 1 л/сут на 1 человека приведены ниже.

|  |           |
|--|-----------|
| Санатории                                      | 400...500 |
| Лечебные учреждения с грязелечением            | 700...800 |
| Дома отдыха, пансионаты                        | 100       |
| Стадионы, спортивные залы<br>(для спортсменов) | 50...60   |
| Стадионы, спортивные залы<br>(для зрителей)    | 3         |



10. Рекреационные факторы и их оценки для массового однодневного отдыха

| Наименование фактора                    | Шкала значений фактора в долях единицы                  |  |  |  |
|---|---|--|--|--|
|   | 0,0...0,2   | 0,2...0,4                                  | 0,4...0,6  | 0,6...0,8                                      |
| Тип дна водоема                         | Илисто-торфяное   | Глинистое                                  | Каменистое   | Гравийное                                      |
| Ширина мелководья, м                    | Более 50  | 50...35                                    | 35...25  | 25...20 и 5...0                                |
| Качество воды                           | С видимыми следами загрязнений                          | С содержанием за-пахов и взвеси сверх норм | В пределах нормы                                       | В пределах нормы для питьевого водоснабжения   |
| Термический режим водоема, °С           | 17  | 17...18                                    | 18...19  | 19...20  |
| Водная фауна                            | Водоемы с бедным видом и малоценным составом ихтиофауны | Водоемы с продуктивностью 5...15 кг/га     | Водоемы с промысловыми видами продуктивностью 30 кг/га | Рыбохозяйственные водоемы с ценными видами рыб |
| Прибрежная растительность               | Болотистая с редким кустарником                         | Мелколесье и еловые леса                   | Луговая растительность                                 | Светлые сосновые леса                          |
| Эстетика ландшафта                      | Слабовыраженный ландшафт                                | Однообразный ландшафт                      | Достаточно выраженный ландшафт                         | Яркие многоплановые живописные виды ландшафта  |
| Наличие комфортабельных мест в сезон, % | Менее 50  | 50...60                                    | 60...70  | 70...80  |
| Историко-культурные ценности            | Отсутствие достопримечательностей                       | Рядовые памятники                          | Более значительные памятники                           | Памятники, охраняемые законом                  |
| Уровень благоустройства                 | Незначительное благоустройство пляжей                   | Дополнительное благоустройство пляжей      | Дополнительные пункты питания                          | Капитальные сооружения                         |

Использование водоемов для отдыха предъявляет высокие требования к качеству воды и определенные требования к режиму водоемов.

Вода, которую применяют для коммунально-бытовых нужд в рекреационных учреждениях, должна соответствовать нормативам качества, принятым для питьевой воды.

Высокое качество воды должно быть в бассейнах, в водоемах, предназначенных для купания и спортивного рыболовства. Поэтому организованные места массового отдыха на воде включают в зоны санитарной охраны.

Качество воды не имеет решающего значения, если водоемы предназначены только для водного спорта: гребли, водных лыж, парусного спорта, водного туризма. Но если они являются еще и зоной для купания (в жаркие месяцы), то требования к качеству воды резко возрастают. В этом случае подготовку ложа водохранилища по всей зоне перемещения уреза воды нужно проводить с соблюдением санитарных требований. Заторфованные территории подвергают специальной обработке – удалению разжиженных торфяных грунтов или засыпке их песчаным (гравелистым) грунтом. Тщательно планируют дно в местах купания, удаляют пни, острые камни в глубоких местах.

При опасности заболачивания берегов предусматривают дренирование этой территории, а для предупреждения заболачивания, заиления и для укрепления берегов – озеленение берегов и другие берегоукрепительные работы.

В интересах рекреации не наполняют водохранилища в начальный период половодья или паводка, который сопровождается наибольшей мутностью потока.

Водохранилища должны иметь достаточную проточность, а их уровень режим должен быть по возможности устойчивым, без резких колебаний в период рекреационного использования (в жаркие месяцы).

Большое значение имеет проведение мероприятий по расширению рекреационной вместимости водохранилищ, так как увеличение рекреационной нагрузки сверх определенного предела, который зависит от природных особенностей местности, нарушает экологическое равновесие (вытаптывание травы, эрозия почв, уменьшение лесных насаждений, загрязнение воды, гибель рыбы и т. д.). Расширить рекреационную емкость можно, осушив мелководья, заболоченные места, оборудовав дополнительно пляжи, а также расширив сети дорог для использования в рекреационных целях других участков водохранилища.

На водохранилищах комплексных гидроузлов возникают противоречия между рекреацией и другими участниками ВХК, требующие разрешения.

Основное отрицательное влияние рекреационного использования водохранилищ проявляется в загрязнении водоемов при купании,

водном туризме, моторными лодками и катерами. Поэтому запрещают рекреационное использование водохранилищ в зонах, примыкающих к водозаборам хозяйственно-питьевого назначения, акватории, используемой для рыбозаведения и заповедных участков.

В свою очередь, на рекреацию отрицательно влияют промышленное и коммунально-бытовое водоснабжение, водный транспорт, которые загрязняют водохранилища при сбросе сточных вод, а также гидроэнергетика, в интересах которой проводят суточное регулирование стока, вызывающее резкое колебание уровня воды.

### 9.11. Природоохранные объекты как участники ВХК\*

Охране от загрязнения, порчи, повреждения, истощения, разрушения и иного нерационального использования подлежат: земля, ее недра, поверхностные и подземные воды, животный мир, леса и иная растительность, ландшафты, атмосферный воздух, памятники природы, редкие растения и животные, естественные экологические системы, климат и озоновый слой Земли.

Создание ВХК может оказать отрицательное влияние на окружающую среду, поэтому необходимо эти воздействия свести к минимуму.

Следствием влияния ВХК на природные объекты являются уменьшение водных ресурсов рек и водоемов, а также ухудшение качества воды в них, которые могут не только трансформировать экосистему, но и привести к полному исчезновению ее биологической части. Поэтому интересы охраны природы надо учитывать не только ограничениями на управляющие воздействия, но и составлять ВХБ с учетом экологических требований реки и ее водосбора как полноправных участников ВХК.

Установлено, что некоторое уменьшение стока и снижение его качества не вызывают необратимых нарушений состояния водной экосистемы. Поэтому необходимо определить допустимые изменения объемов стока и качества вод, не приводящие к деградации нижнего бьефа реки и ее водосборной площади (более подробно эти вопросы рассмотрены во второй главе).

**Борьба с вредным воздействием вод.** Наводнения, водная эрозия, включая сели, оползни, разрушение берегов, — распространенные явления, характеризующиеся или разрушением хозяйственных построек, гибелью людей, снижением плодородия почв на обширных территориях. Они наносят немалый экономический и экологический ущерб. Борьба с этими явлениями, получившими название вредного воздействия вод, — одна из задач водного хозяйства, решать которую надо одновременно с водохозяйственным строительством, мелиорацией земель и включать в ВХК в качестве самостоятельного участника.

---

\*Раздел написан совместно с В. Н. Маркиным и С. А. Федоровым.

Причинами наводнения являются: интенсивное таяние снегов (весной) и ледников (летом); сильные и длительные ливни; заторы и зажоры льда; разрушение дамб и плотин; ветры со стороны моря и т. п.

При наводнениях значительно поднимаются уровни воды в водотоках и увеличиваются (до 1000 раз) по сравнению с меженными периодами, расходы. В результате наводнения появляется угроза безопасности населения: происходит повреждение промышленных и гражданских объектов, сокращаются сроки их службы; снижается или гибнет весь урожай сельскохозяйственных культур; гибнет скот (как во время наводнения, так и из-за нехватки кормов); нарушаются связь, электроснабжение; простаивают промышленные предприятия, транспорт, разрушаются дороги и пр.

Наиболее распространенная мера борьбы с наводнениями – строительство крупных водохранилищ, способных принять значительные объемы воды в период половодий. Однако создание таких водохранилищ приводит к затоплению значительных территорий. Правильный выбор места для такого водохранилища не только исключит бесконтрольные затопления огромных территорий, но и значительные потери от создания самого водохранилища.

Защитить значительные территории от затопления можно, построив специальные дамбы (защитные сооружения в зонах влияния Куйбышевского и Чебоксарского водохранилищ). Иногда такие сооружения устраивают для защиты крупных населенных пунктов в низовьях рек, впадающих в морские заливы, или для защиты территорий, прилегающих к морю.

Снизить пики половодий можно, проведя различные лесомелиоративные и агротехнические мероприятия: посадку леса, кустарников, снегозадержание, пахоту поперек склонов. Все это способствует переводу поверхностного стока в подземный. При этом уменьшается высота дамб, а следовательно, и стоимость их сооружения.

*Эрозия почв* – процесс разрушения и сноса почвенного покрова (иногда и почвообразующих пород) потоками воды и ветром – явление чрезвычайно распространенное в различных регионах земного шара. Наиболее опасна водная эрозия или особенно такое ее проявление, как овражная эрозия (распространена в России). Средняя скорость образования оврагов составляет 1...25 м в год.

Ирригационная эрозия – разновидность водной, образующейся, например, в связи с нарушением правил полива. Наиболее эффективные меры борьбы с овражной эрозией – лесотехнические мелиорации, создание специальных ливнесбросных конструкций на откосах и т. п.

*Селевые* (грязе-каменные) потоки и *оползни* – наиболее опасные формы водной эрозии в горных районах.

Для защиты от селевых потоков сооружают специальные селезащитные дамбы в опасных расщелинах гор. В 1966 г. в Казахстане на р. Малая Алмаатинка (урочище Медео) была сооружена дамба, расчи-

танная на задержание селя объемом до 6 млн м<sup>3</sup>. В 1973 г. этой дамбой был остановлен селя объемом 4 млн м<sup>3</sup>.

Как участник ВХК, борьба с вредным воздействием вод может существенно влиять на режим работы комплексных гидроузлов (например, при борьбе с наводнением с помощью водохранилищ). Если не проводить мероприятий по борьбе с вредным воздействием вод, то можно значительно осложнить водопользование и ведение хозяйства на значительных территориях (в случаях наводнения, эрозии почв) или существенно ухудшить качество водных ресурсов (в случае эрозии почв, селевых потоков).

### 9.11.1. Допустимые нагрузки на водную экосистему

Экосистемы в нормальных условиях устойчивы, т. е. обратимо реагируют на внешние воздействия, возвращаясь после снятия нагрузки к исходному состоянию.

Допустимыми называют воздействия, не вызывающие потери устойчивости экосистемы. Наиболее подходящим для водохозяйственных целей является показатель, связывающий устойчивость водной экосистемы с регулируемыми параметрами ее состояния.

Если рассматривать характеристики водной среды (объем стока, параметры, отражающие качество вод) как случайные величины, то свойства этих величин будут выражаться через законы распределения вероятностей.

Случайные – это величины, конкретные значения которых по какой-либо причине неизвестны и наоборот, а детерминированные (неслучайные) – полностью определенные величины.

Вид закона распределения, например, точек попадания снаряда в цель или концентраций биогенного вещества в воде отражает механизм процессов, протекающих в изучаемом объекте, которому подчиняется данное явление.

Дифференциальный закон  $g(\varphi)$  (плотность) распределения вероятностей показывает, какие значения распределенной величины в выборке встречаются чаще, а какие реже.

Любая, в том числе и природная, система есть продукт сформировавшихся ее условий. Условия, "слепившие" экосистему, становятся в то же время наилучшими (оптимальными) для поддержания ее структуры. Именно поэтому система сохраняет устойчивость в привычной для нее среде. Привычные же условия, т. е. встречающиеся чаще других в обычной для системы обстановке, соответствуют наиболее вероятным, модальным ( $\varphi$ ), значениям распределенных параметров. Таким образом, в устойчивой экосистеме модельные значения параметров состояния совпадают с оптимальными ( $\varphi_{opt} = V_{opt}$  – оптимальный объем стока с водосбора), а законы распределения этих параметров выражают требования экосистемы к условиям среды [закон распределения стока показывает, насколько привычна или оптимальна та или иная величина стока для экосистемы данного водосбора].

Потерявшей же устойчивость системе не могут быть "привычны" какие-либо определенные значения параметров состояния, поскольку они меняются во времени. Следовательно, последнее утверждение для потерявшей устойчивость экосистемы не является необходимым.

Состояние экосистемы может меняться, что выражается в нарушении исходного распределения ее характеристик [см. закон распределения  $g_2(V)$ ]. Тогда в качестве критерия сохранности исходных свойств (функций) экосистемы используют показатель, выделяющий долю оставшихся в новых условиях существования изначальных требований экосистемы. На рисунке 47 показаны плотности исходного и конечного распределений объемов стока ( $\varphi = V$ ) при безвозвратном потреблении воды из реки ( $\Delta V = V_{б.в}$ ). Вероятность сохранения прежних требований, которая и характеризует целостность исходных функций экосистемы, численно равна площади пересечения фигур, ограниченных законами распределения и осью абсцисс:

$$P_{\varphi} = \int_{\varphi} \min [q_1(\varphi); q_2(\varphi)] d\varphi, \quad (54)$$

где  $P_{\varphi}$  — вероятность события, заключающегося в том, что в новых условиях сохранились прежние требования экосистемы к фактору  $\varphi$  (доля сохранившихся требований);  $q_1(\varphi)$ ;  $q_2(\varphi)$  — плотности исходного и конечного распределений фактора;  $\min [q_1(\varphi); q_2(\varphi)]$  — операция выбора минимального значения между функциями  $q_1(\varphi)$  и  $q_2(\varphi)$  при каждом значении аргумента  $\varphi$ .

Степень трансформации исходных свойств (функций) экосистемы дополняет до единицы вероятность сохранения прежних требований:

$$q_{\varphi} = 1 - P_{\varphi}, \quad (55)$$

где  $q_{\varphi}$  — вероятность события, заключающегося в том, что в новых условиях прежние требования экосистемы к фактору не сохранились (доля трансформации требований).

Если в новых условиях закон распределения остался прежним ( $P_{\varphi} = 1$ ;  $q_{\varphi} = 0$ ), то, несмотря на воздействия, функции экосистемы не нарушены; если же исходное распределение радикально изменилось ( $P_{\varphi} = 0$ ;  $q_{\varphi} = 1$ ), то свойства прежней экосистемы по данному показателю полностью утеряны.

Оценки показывают, что устойчивость экосистемы сохраняется при нарушениях ее функций, не превышающих десятки процентов:

$$q_{\varphi} \approx 0,1; P_{\varphi} \approx 0,9. \quad (56)$$

Воздействия на систему, которые не изменяют ее функций, большие указанного предела, называют допустимыми. Чрезмерные же нарушения вызывают необратимую перестройку экосистемы, в ходе которой населяющие ее организмы постепенно уступают место видам, более приспособленным к новым условиям среды.

Проиллюстрируем технику использования данного метода на примере оценки влияния хозяйственной деятельности на гидрохими-

11. Показатели качества воды мвлых рек севера Эстонии в створах с условно чистыми водами и загрязненных хозяйственными стоками

| Показатель  | Единица измерения | Условно чистые воды                  |   | Воды с хозяйственными стоками        |   | Вероятность (доля)                        |  |
|---|-------------------|--------------------------------------|---|--------------------------------------|---|---|--|
|   |                   | средне-арифметическое значение $a_x$ | средне-квадратическое значение $\sigma_x$ | средне-арифметическое значение $a_x$ | средне-квадратическое значение $\sigma_x$ | сохранения исходных функций системы $P_x$ | нарушения исходных функций системы $Q_x$ |
| Кислотность среды pH  | —                 | 7,97                                 | 0,23                                      | 7,67                                 | 0,23                                      | 0,52                                      | 0,48                                     |
| Абсолютное содержание растворенного кислорода $O_2$                           | мг/л              | 10,4                                 | 2,5                                       | 7,3                                  | 3,4                                       | 0,63                                      | 0,37                                     |
| Степень насыщения воды кислородом $O_2/O_{2max}$                              | %                 | 88,7                                 | 17,2                                      | 63,5                                 | 23,6                                      | 0,59                                      | 0,41                                     |
| Общая жесткость   | мг·экв. на 1 л    | 5,0                                  | 0,8                                       | 4,8                                  | 1,2                                       | 0,91                                      | 0,09                                     |
| Сумма ионов $\Sigma И$  | мг/л              | 420,0                                | 44,0                                      | 425,0                                | 66,0                                      | 0,99                                      | 0,01                                     |
| Биохимическое потребление кислорода за пять суток экспозиции БПК <sub>5</sub> | мг/л              | 1,5                                  | 1,0                                       | 5,5                                  | 6,8                                       | 0,64                                      | 0,36                                     |
| Содержание аммонийной формы азота $N-NH_4$                                    | мг/л              | 0,49                                 | 0,52                                      | 1,76                                 | 1,76                                      | 0,58                                      | 0,42                                     |
| То же нитратной формы $N-NO_3$  | мг/л              | 2,92                                 | 2,23                                      | 2,38                                 | 2,12                                      | 0,90                                      | 0,10                                     |
| Содержание фосфора $P_{общ}$  | мг/л              | 0,14                                 | 0,22                                      | 0,58                                 | 0,45                                      | 0,72                                      | 0,28                                     |

ческие показатели состояния малых рек севера Эстонии в створах, подвергшихся загрязнению сточными водами и условно чистых (табл. 11) (распределения всех характеристик качества вод приняты нормальными с математическими ожиданиями  $d_{xi}$  и дисперсиями  $\sigma_{xi}^2$ ).

Результаты расчетов показывают, что изменения абсолютных величин параметров качества вод составили:

для общей жесткости (о. ж.)  $(4,8 - 5) / 5 \cdot 100 \% = 4 \%$ ;

для суммы ионов ( $\Sigma И$ )  $(425 - 420) / 420 \cdot 100 \% = 1,2 \%$ ;

для содержания нитратного азота ( $N-NO_3$ )  $(2,23 - 2,92) / 2,92 \cdot 100 \% = -18,5 \%$ .

Тем не менее это существенно не нарушало функций экосистемы по данным показателям, поскольку вероятности сохранения прежних свойств водной экосистемы, рассчитанные по формуле (56), оказались достаточно высокими ( $P_{\varphi} \geq 0,9$ ):

$P_{o.ж} = 0,91$ ;  $P_{\Sigma И} = 0,99$ ;  $P_{N-NO_3} = 0,9$ .

Изменения средних значений других параметров качества вод составили:

для водородного показателя (рН)  $(7,67 - 7,97) / 7,97 \cdot 100 \% = -3,8 \%$ ;

для содержания растворенного кислорода ( $O_2$ )  $(7,3 - 10,4) / 10,4 \times 100 \% = -29,8 \%$ ;

для степени насыщения кислородом ( $O_2/O_2^{max}$ )  $(63,5 - 88,7) / 88,7 \times 100 \% = -28,4 \%$ ;

для биохимического поглощения кислорода (БПК<sub>5</sub>)  $(5,5 - 1,5) / 1,5 \times 100 \% = 266,7 \%$ ;

для содержания аммиачного азота ( $N-NH_4$ )  $(1,76 - 0,49) / 0,49 \cdot 100 \% = 259,2 \%$ ;

для содержания общего фосфора ( $P_{общ}$ )  $(0,58 - 0,14) / 0,14 \cdot 100 \% = 314,3 \%$ .

Столь значительные изменения химического состава вод вызвали существенные ( $q_{\varphi} > 0,1$ ) изменения функций водной экосистемы:  $P_{pH} = 0,52$ ,  $P_{O_2} = 0,63$ ,  $P_{O_2/O_2^{max}} = 0,59$ ,  $P_{БПК_5} = 0,64$ ,  $P_{N-NH_4} = 0,58$ ,  $P_{P_{общ}} = 0,72$ .

Низкое содержание кислорода, повышение концентрации аммиачного азота, фосфора и органического вещества в воде могут стать причиной эвтрофирования воды. Следовательно, эти реки нуждаются в срочных природоохранных мероприятиях, первоочередной задачей которых должно явиться изменение кислотности воды.

### Контрольные вопросы и задания

1. Чем комплексное использование водных ресурсов отличается от поотраслевого? Допустимо ли поотраслевое водопользование в настоящее время?
2. Почему водопотребители в уравнение ВХБ входят как аддитивные члены, а водопользователи — в виде итоговой суммы максимальных попусков за более короткие промежутки времени?
3. Как учитываются в уравнении ВХБ водопользователи, расположенные в верхнем бьефе; водопотребители; расположенные в нижнем бьефе?



4. Проанализируйте, к изменениям каких слагаемых и самой структуры уравнения ВХБ ведет использование методов преодоления дефицита водных ресурсов в отдельных отраслях ВХК?
5. Как увязывают между собой водохозяйственный и гидрохимический балансы?
6. Насколько должны быть сохранены исходные характеристики экосистемы створа реки и водосборной территории, чтобы нагрузки на нее можно было бы считать допустимыми?
7. Почему водооборотные системы экологически наиболее безопасны?
8. Как в экологическом отношении, формируя гидрограф попусков, наилучшим образом распорядиться избытком водных ресурсов в регулируемом створе?

## Глава 4

### УПРАВЛЕНИЕ ВОДОХОЗЯЙСТВЕННЫМИ СИСТЕМАМИ

*Водохозяйственная система (ВХС)* – это комплекс взаимосвязанных водных объектов и гидротехнических сооружений, предназначенных для обеспечения рационального использования и охраны вод участниками ВХК.

Рассмотрим три аспекта описания ВХС – морфологический, функциональный и информационный.

Морфологически ВХС может быть расчленена на иерархические уровни по территориальному признаку (рис. 45). Водохозяйственная система страны объединяет региональные ВХС, которые, в свою очередь, состоят из бассейновых систем. Внутри бассейнов можно выделить водохозяйственные районы и водохозяйственные участки. Основным элементом ВХС водохозяйственного участка является комплексный гидроузел – плотина и образованное ею водохранилище с совокупностью технических устройств, предназначенными для многоцелевого использования водных ресурсов на выделенном водохозяйственном участке.

В качестве примера можно рассмотреть водохозяйственную систему европейской территории России, которая включает ВХС бассейнов рек Волги, Дона, Днепра и т. д. Бассейновая ВХС реки Волги может быть расчленена на ВХС Верхней, Средней и Нижней Волги. Каждая из этих ВХС состоит из нескольких водохозяйственных участков, на которых расположены комплексные гидроузлы, образующие вместе каскад гидроузлов. Каждый комплексный гидроузел может иметь гидроэлектростанции, водозаборные станции, нерестилища и т. п.

В задачи функциональной структуры ВХС входят: добыча (регулирование) водных ресурсов, транспортировка, распределение их между потребителями, сбор сточных вод и подготовка их для повторного использования.

Многообразие элементов ВХС предопределяет наличие больших информационных потоков между ними. Это вызывает необходимость специального информационного описания ВХС – совокупности дан-

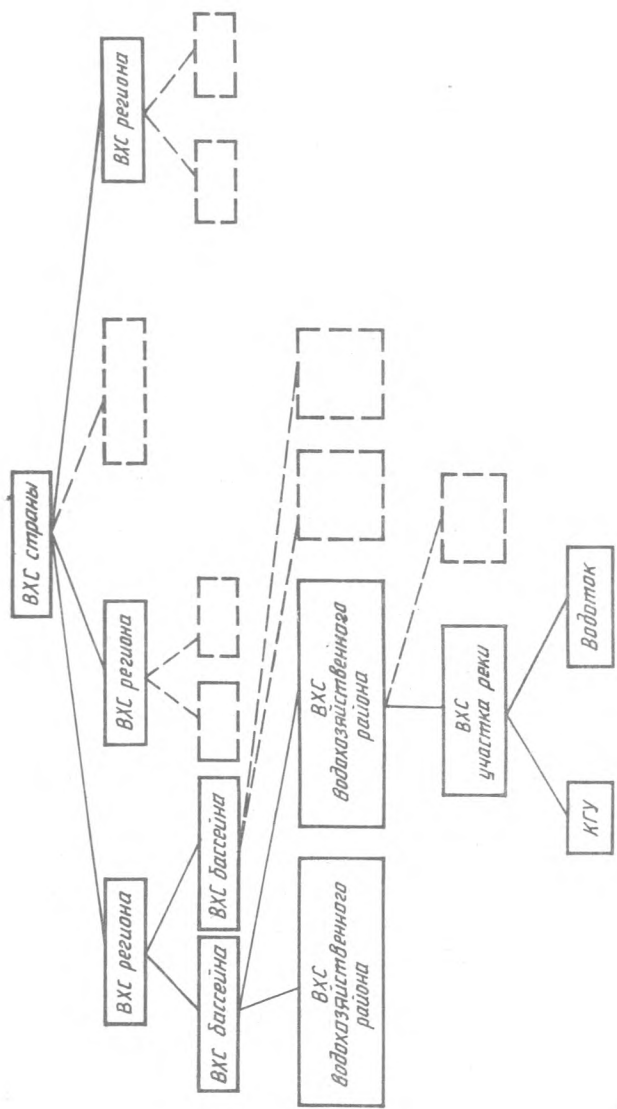


Рис. 45. Иерархическая структура VKS

ных, которые взаимодействуют и преобразуются в процессе ее функционирования.

Таким образом, иерархическая структура, наличие большого числа разнородных элементов, рассредоточенных на значительной территории, многообразие функций – отличительные черты ВХС.

К особенностям ВХС относят:

многообразие взаимодействия с окружающей средой, большое влияние на окружающую среду, которое необходимо учитывать при управлении функционированием ВХС;

недостаточная достоверность информации о водопотреблении и водоотведении;

многообразие прямых и обратных связей между элементами системы (гидравлические, технические, социальные, экономические, информационные);

функционирование в условиях случайных воздействий;

длительность формирования и непрерывность развития;

высокая капиталоемкость и вследствие этого большой ущерб от неудачных экономических решений;

неопределенность исходной информации при планировании развития ВХС, которая возникает из-за того, что величины, определяющие будущее водопотребление (информация о развитии производства, изменениях демографической ситуации, технико-экономических показателях), обычно задаются со значительной неопределенностью вследствие своего прогнозного характера;

противоречивость требований к режиму источника водопотребителей, являющихся участниками ВХК;

возможность многократного использования ресурса;

невозможность замены водного ресурса другим для отдельных участников ВХК;

возможность значительного антропогенного воздействия на водные ресурсы.

Перечисленные свойства ВХС (многочисленность и неоднородность элементов, связей между ними, функций, наличие неопределенностей и т. д.) позволяют отнести их к большим кибернетическим системам, что обуславливает особенности управления ими (см. введение).

## 10. ЗАДАЧИ, РЕШАЕМЫЕ ПРИ УПРАВЛЕНИИ ВХС

Управление ВХС можно расчленить на ряд задач, которые условно объединим в две группы: формирование структуры вновь создающейся или развивающейся ВХС и управление режимами работы функционирующей ВХС.

При решении задач первой группы осуществляют долгосрочное планирование использования водных ресурсов. При этом учитывают, что ВХС – составная часть ВХК, который, в свою очередь, есть подсистема народнохозяйственного комплекса соответствующей территории.

В первой группе задач обосновывают и определяют:

размещение по территории, состав и мощность водоемких производств;

размещение водохранилищ и их параметры;

размещение, параметры и состав водохозяйственных объектов (водозаборных устройств, каналов и т. п.);

мероприятия по охране природы, поддерживающие высокое качество воды в бассейне при проведении водохозяйственных операций.

На каждом уровне иерархии ВХС решает свой комплекс задач по формированию ее структуры. Имеется ряд задач, которые являются общими для нескольких уровней, но степень детализации в них различна. Например, размещение водоемких производств можно обосновывать на уровне страны, региона и бассейна, а определять состав, параметры и место водохозяйственных объектов – на уровне бассейна и водохозяйственных участков и т. п. На всех уровнях устанавливают состав природоохранных мероприятий при проведении водохозяйственных работ.

Вторая группа задач, в свою очередь, может быть разделена на две подгруппы: выработка плана работы функционирующей или планируемой ВХС на некоторый период и реализация этого плана.

В результате решения задач первой подгруппы определяют планируемые объемы попусков воды из верхних бьефов водохранилищ в каждый момент времени, уровни воды в водохранилищах и каналах, режимы работы водохозяйственных объектов.

В соответствии с особенностями планирования использования водных ресурсов расчеты ведут по нескольким вариантам исходных данных (гидравлических, режимов потребления воды сельскохозяйственными, рыбохозяйственными и другими потребителями, требования которых зависят от метеорологических условий, носящих стохастический характер).

При эксплуатации необходимо выбрать вариант плана, наиболее подходящий к конкретной водохозяйственной обстановке, и откорректировать его в соответствии со складывающимися метеорологическими условиями. Реализуют скорректированный план, регулируя потоки воды в водотоках.

Управление ВХС базируется на результатах расчетов водохозяйственных балансов (ВХБ) и объемов воды, выделяемых каждому из потребителей. Методика расчетов ВХБ рассмотрена в главе 2, а расчеты распределения воды между потребителями при дефиците воды – ниже. Последние проводят несколько раз по мере уточнения информации.

Сложность ВХС определяет и сложность управления ими. Рассмотрим основные методы управления такими системами.

## 11. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ПРИНЦИПЫ УПРАВЛЕНИЯ БОЛЬШИМИ ВХС

Управление – это воздействие на динамическую систему для обеспечения ее целенаправленного поведения и развития при изменяющихся условиях работы.

При формировании системы ее управляемые элементы объединяют в управляемую часть – объект управления. Совокупность управляющих элементов образует управляющую подсистему. Обе части взаимодействуют с помощью информационных связей (рис. 46). Управление сложной системой, подвергающейся многообразному и часто меняющемуся воздействию внешней среды, сопряжено с привлечением большого объема информации. Поэтому эффективное управление сложной системой целесообразно лишь по иерархическому принципу. Информация, поступающая от объекта управления, движется снизу вверх по иерархическим ступеням и при этом последовательно сжимается. Каждый низший уровень управления предстает перед высшим как "черный ящик", т. е. информирует лишь о результатах своей деятельности, но не о внутренних процессах, связанных с ее реализацией. В ответ управляющая подсистема на основе анализа поступившей информации вырабатывает управляющее воздействие, направленное на уменьшение отклонения фактического поведения управляемой подсистемы (значения управляемых величин) от его расчетного значения.

Выбор управляющих воздействий принимают не только на стадии управления поведением системы (способом ее функционирования), но и на стадии ее формирования, т. е. выбора ее составляющих и их параметров. Решения (выбор), по тем или иным признакам предпочтительнее других, называют оптимальными, а управление, основанное на принятии таких решений, – оптимальным.

Параметры, совокупность которых образует решение, – элементы решения. Элементами решения могут быть различные числа, векторы, функции и т. п., например объем воды, выделяемый участнику ВХС, параметры водохранилища, дата начала холостых сбросов и т. п.

При управлении необходимо в множестве возможных решений

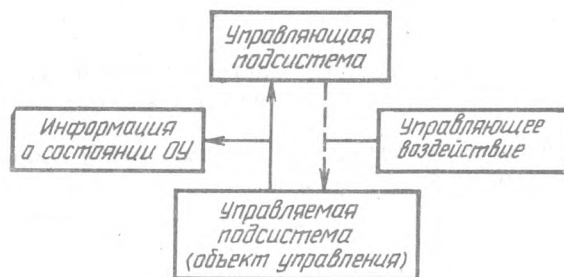


Рис. 46. Информационные связи в динамической системе

выделить те решения  $x$ , которые эффективнее других по какому-либо показателю. Эти показатели называют целевыми функциями, так как они показывают, насколько принятое решение способствует достижению принятой цели управления.

При выборе оптимального решения предпочтение отдают тому решению, которое обращает целевую функцию в максимум или минимум.

Научной дисциплиной, занимающейся проблемами принятия решений в условиях, когда необходима переработка большого объема информации различной физической природы, является системный анализ.

Принятие решений при системном анализе состоит из следующих этапов:

определения целей функционирования системы, т. е. конечного результата, на достижение которого направлено создание системы, а также составления на основе этих целей целевых функций;

выявления всех возможных управляющих решений, или, иначе говоря, альтернативных стратегий, ведущих к достижению целей функционирования системы;

оценки приемлемости, сравнения стратегий и выбора альтернативы, наилучшим способом обеспечивающей достижение целей.

Иначе говоря, при принятии управленческих решений необходимо наметить цели, проанализировать возможные пути их достижения и выбрать наиболее подходящий из них. Например, необходимо обеспечить водой промышленное предприятие. При этом можно рассмотреть различные источники и системы водоснабжения, каждый из которых позволяет получить воду определенного качества с различными материальными затратами на доставку воды, ее подготовку и на природоохранные мероприятия. Проанализировав эти варианты, выбирают наиболее подходящий из них, например по минимуму затрат.

Методы управления количеством и качеством водных ресурсов рассмотрены во введении и разделе 2.

## 12. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

*Математическое моделирование* – это процесс построения и исследования математических моделей, отображающих реальную систему. В отличие от физического моделирования здесь нет необходимости построения физической копии реальной системы. Математическая модель – это математические выражения, показывающие связь между входными (независимыми, управляющими) и выходными переменными, характеризующими систему. Например, для ВХС это связь между объемами воды, выдаваемыми каждому участнику ВХК, и эффектом от функционирования системы.

При математическом моделировании применяют математические

модели различного типа, которые классифицируют по признакам: характеру описания проблем (глобальные, локальные); способу описания (динамические, статические); характеру решаемых задач (дескриптивные, нормативные); предоставлению исходной информации (детерминированные, стохастические);

виду (числовые, логические);

способу моделирования (оптимизационные и имитационные).

Рассмотрим эти виды математических моделей.

Глобальные модели позволяют получить стратегические решения, которые затем детализируют и уточняют на локальных моделях систем. При построении глобальных моделей используют агрегированные, усредненные данные.

Локальные модели создают для решения частных задач, полученных при декомпозиции графа целей и задач, в котором цели, которые необходимо достичь при функционировании, представлены в иерархическом виде. Граф целей (см. рис. 1) построен так, что на любом уровне достижение цели необходимо для осуществления целей более высокого уровня, но, в свою очередь, она сама может быть реализована лишь при условии выполнения связанных с ней целей более низкого уровня.

Так, цели и задачи можно разделить по признакам: территориальному (страна, регион, бассейн, участок, отдельный водопотребитель) временному (долгосрочное планирование, краткосрочное, оперативное управление), отраслевому и т. д.

Локальные модели одного уровня иерархии подразделяют на модели управления и феноменологические, описывающие протекание физических процессов при разных условиях функционирования систем. К феноменологическим моделям можно отнести модели, описывающие режим формирования водных ресурсов, зависимости между объемом водных ресурсов и объемом полученной при его использовании продукции.

Если в математической модели состояние объекта (системы) описывается вне связи с его состоянием в другие моменты времени, т. е. соотношения между входными параметрами и выходными принимают независимыми от времени, то эти модели называют статическими. В отличие от них в динамических моделях находит отражение способ функционирования объекта или системы, т. е. объект (система) описывается в развитии. Они необходимы для того, чтобы прогнозировать развитие системы. Модель описывают с помощью системы дифференциальных уравнений (в моделях с непрерывным временем), разностных уравнений (в моделях с дискретным временем).

Динамическая модель позволяет учесть изменения требований к системе или изменение со временем ее параметров и способов управления.

Дескриптивная модель предназначена для описания и объяснения наблюдаемых фактов или прогноза поведения системы. Применяют ее при имитационном моделировании, когда требуется найти ответы на вопросы: как происходит протекание процесса функционирования ВХС? Как она будет развиваться при тех или иных управляющих воздействиях.

Нормативные модели в отличие от дескриптивных предназначены для нахождения желательного (например, оптимального) состояния системы. Используют их для ответа на вопрос: как должно быть?

Детерминированной моделью систему описывают, если при неизменных параметрах управляющее воздействие на систему вызывает однозначный результат.

В стохастической модели в отличие от детерминированной учитывают влияние случайных возмущений. Поведение системы определяется вероятностным распределением случайных величин, связанных стохастическими зависимостями. Стохастические модели более адекватны действительности, поскольку режим водных ресурсов и режим их потребления некоторыми участниками имеют стохастический характер, т.е. исходная информация представляется случайными величинами (см. выше задачу обоснования необходимости мелиорации). Однако при решении оценочных задач точность детерминированной модели будет достаточной, т.е. отклонения действительных значений от величин, найденных с помощью детерминированных моделей, несмотря на стохастический характер исходных данных, несущественны.

Числовые модели – это математические модели, представленные в виде математических зависимостей (функций) между входами и выходами модели с конкретными числовыми характеристиками.

Логические модели в отличие от числовых представляют в виде блок-схемы алгоритмов или программ. Используют их при имитационном моделировании ВХС.

Оптимизационные модели применяют при оптимальном управлении ВХС, которые позволяют выбрать наиболее эффективное решение в соответствии с принятым критерием оптимальности.

Критерий – это формальное описание цели и качества функционирования системы, который служит для сравнения альтернативных решений при управлении системой. Частным случаем критерия является критерий оптимальности – показатель, выражающий предельную меру для сравнительной оценки возможных решений и выбора наилучшего из них. При решении оптимизационных задач за критерий оптимальности обычно берут целевую функцию. Модель состоит из целевой функции, способной принимать значения в пределах области, ограниченной условиями задачи (область допустимых значений), и ограничений, характеризующих эти условия.

В свою очередь, целевая функция состоит:



из управляемых переменных  $x_i$ , характеризующих вариант управленческого решения (элементы решения);

параметров  $y_i$  (переменных или постоянных величин, не поддающихся или не нуждающихся в управлении).

Целевая функция имеет вид

$$F = f(x_i, y_i) \rightarrow \max, \quad (57)$$

где  $F$  — критерий оптимальности.

Общий вид оптимизационной модели с учетом ограничений

$$\left. \begin{aligned} F = f(x_i, y_i) \rightarrow \max; \\ x_i \in A, \end{aligned} \right\} \quad (58)$$

где  $A$  — величины, определяемые ограничениями модели;  $\in$  — знак принадлежности к множеству.

В водохозяйственных задачах ограничениями являются сырье, трудовые ресурсы, финансовые возможности развития предприятий-участников ВХК, потребность в их продукции и т. п. Ограничения модели представляют собой систему уравнений или неравенств, которые могут быть линейными или нелинейными.

Целевая функция также может быть линейной или нелинейной. Число элементов решения определяет размерность задачи. Размерность водохозяйственных задач обычно очень велика, поэтому при анализе оптимизационных задач возникает необходимость сокращения ее, например, путем агрегирования (объединения, укрупнения показателей по какому-либо признаку).

При решении оптимизационных задач применяют методы математического программирования. В зависимости от вида целевой функции, размерности задачи, вида и числа ограничений при решении оптимизационных задач при управлении ВХС можно применять линейное, динамическое и стохастическое программирование.

Среди задач математического программирования самыми простыми и наиболее изученными являются задачи линейного программирования. В этом случае оптимизационную модель записывают в следующем виде:

$$L = C_1x_1 + C_2x_2 + \dots + C_nx_n \rightarrow \max; \quad (59)$$

$$a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + \dots + a_{1n}x_n = B_1;$$

$$a_{21}x_1 + a_{22}x_2 + \dots + a_{2n}x_n = B_2;$$

$$\dots \dots \dots$$

$$a_{m1}x_1 + a_{m2}x_2 + \dots + a_{mn}x_n = B_m;$$

$$x_1 \geq 0, x_2 \geq 0, \dots, x_n \geq 0, \quad (61)$$

где формулы (59) — целевая функция, (60) и (61) — ограничения;  $x_i$  — элементы решения;  $C_1, C_2, \dots, C_n$  — фиксированные числа (коэффициенты).

Если использовать матричную запись

$$\begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{m1} & a_{m2} & \dots & a_{mn} \end{pmatrix} \quad (62)$$

и векторы  $\bar{C} = (C_1, C_2, \dots, C_n)$ ;  $\bar{x} = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ ;  $\bar{B} = (B_1, B_2, \dots, B_n)$ , то можно линейную оптимизационную модель представить в более компактном виде:

$$\begin{aligned} L &= \bar{C}\bar{x} \rightarrow \max; \\ A\bar{x} &= \bar{B}; \\ \bar{x} &\geq 0. \end{aligned} \quad (63)$$

Решение  $x = (x_1, x_2, \dots, x_n)$  – оптимальное, если целевая функция достигает своего экстремального значения.

Расчеты моделей линейного программирования довольно просты. Почти на каждой ЭВМ имеются программы для решения такого типа задач, поэтому для получения результатов достаточно задать входные данные (т. е. значения векторов  $\bar{C}$ ,  $\bar{B}$ , матрицы  $A$ ) для конкретной задачи.

Недостаток этого метода – требование линейности целевой функции и ограничений, что справедливо лишь для ограниченного круга задач управления ВХС. Зная применение этого метода в случае нелинейных целевых функций и ограничений, используют приемы линеаризации функций, например замену нелинейной функции набором линейных функций. Однако это не всегда возможно. Поэтому модели линейного программирования используют в основном для предварительных ориентировочных расчетов ВХС.

Эффективным методом решения оптимизационных задач является метод динамического программирования, поскольку при этом не ограничивается тип целевой функции и ограничений, просто и точно учитывается стохастический характер исследуемых процессов. Достоинство этого метода – возможность оптимизировать динамические процессы. Однако это довольно сложно, так как предъявляются более высокие требования к быстродействию вычислительных машин. Поэтому применение метода динамического программирования для управления ВХС ограничено. Но его успешно используют для решения задачи распределения водных ресурсов между участками ВХК, между орошаемыми участками и т. д.

При динамическом программировании процесс принятия решений является многошаговым. Полученный для предыдущего этапа (времени, места) результат вводят в уравнение для расчета следующего этапа. Вместо одной задачи со многими переменными рассматривают несколько задач с одной переменной, что возможно, когда критерий оптимальности аддитивен, т. е. общее оптимальное решение – сумма оптимальных решений каждого шага.

Выбор оптимального решения при использовании алгоритма динамического программирования рассмотрим на примере решения задачи распределения дефицитных водных ресурсов между участниками ВХК.

Требуется определить водоподачу  $x_i$  каждому участнику комплекса так, чтобы суммарный доход всех участников был бы максимальным. В этом случае целевая функция имеет вид

$$D = \sum_1^m d_i(x_i) \rightarrow \max, \quad (64)$$

где  $d_i(x_i)$  — доход  $i$ -го участника ВХК, которому выделяется ресурс  $x_i$ ;  $m$  — число участников, между которыми распределяется вода.

Ограничения задачи:

$$\begin{cases} x_i \geq 0; \\ \sum_1^m x_i = W, \end{cases} \quad (65)$$

где  $W$  — распределяемый между участниками ВХК ресурс воды.

Предположим, что функция

$$d_i(x) = f(x) \quad (66)$$

каждого участника известна, причем, начиная с некоторой величины  $x$ , доходы  $d_i$  возрастают медленнее, т. е. функция (66) имеет нелинейный характер (рис. 47). Следовательно, и функция  $D = \sum_1^m d_i(x_i)$  также нелинейная, поэтому решим задачу с помощью алгоритма динамического программирования.

Подачу воды каждому участнику рассматривают как шаг оптимизации. Таким образом, величины  $x_i$  определяют в результате многошаговой процедуры принятия решений, что характерно для динамического программирования.

На первом шаге оптимизации рассмотрим только одного участника, считая, что других участников нет. Тогда весь распределяемый ресурс можно отдать этому участнику. Будем считать, что распределяемый ресурс имеет переменную величину  $\omega$ .

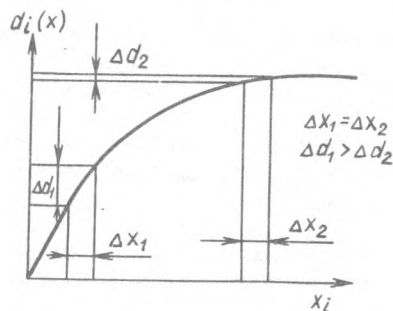


Рис. 47. Зависимость дохода  $d_i(x)$   $i$ -го участника ВХК от объема выделяемого ему ресурса  $x_i$

Назовем доход, полученный на этом шаге оптимизации, условным, так как остальные участники комплекса не рассматриваются. Этот доход, который в дальнейшем будем называть условным оптимальным выигрышем на рассматриваемом шаге оптимизации,

$$D_1^*(\omega) = d_1(\omega). \quad (67)$$

Подставив несколько значений  $\omega$ , можно построить зависимость  $D_1^* = f(\omega)$ , которая на первом шаге оптимизации совпадает с кривой зависимости  $d_1 = f(x)$ .

Теперь примем, что участников два. Следовательно, ресурс  $\omega$  распределяют между ними. Если второму участнику выделим ресурс в объеме  $x$ , то первому остается  $\omega - x$ . Общий доход двух участников

$$D_2 = d_2(x) + d_1(\omega - x). \quad (68)$$

Для его определения воспользуемся зависимостью (66).

Необходимо найти такое значение объема воды, выделяемой второму участнику,  $x_2^*$ , при котором этот доход будет максимальным. Тогда на втором шаге оптимизации условной оптимальный выигрыш:

$$D_2^* = \max \{d_2(x_2^*) + D_1^*(\omega - x_2^*)\}, \quad (69)$$

Проведя расчеты для нескольких значений распределяемого ресурса  $\omega$ , получим зависимость

$$D_2^* = f(\omega), \quad (70)$$

и зависимость условного оптимального объема, выделяемого на втором шаге оптимизации (число рассматриваемых участников равно двум) второму участнику  $x_2^*$ , от величины распределяемого ресурса

$$x_2^* = f(\omega). \quad (71)$$

Примем, что участников три и, проведя оптимизацию распределения ресурса  $\omega$  между тремя участниками, получим условный оптимальный выигрыш на третьем шаге оптимизации:

$$D_3^* = \max \{d_3(x_3^*) + D_2^*(\omega - x_3^*)\}, \quad (72)$$

где  $x_3^*$  — условный оптимальный объем, выделяемый третьему участнику на третьем шаге оптимизации.

При расчете по зависимости (72) используют результаты оптимизации на предыдущем шаге [для получения величины  $D_2^*(\omega - x_3^*)$ ].

Расчет делают для нескольких значений распределяемого ресурса, что позволяет получить зависимости:

$$D_3^* = f(\omega); \quad (73)$$

$$x_3^* = f(\omega), \quad (74)$$

которые нужны для последующих шагов оптимизации.

Таким образом, на  $i$ -м шаге оптимизации, когда в рассмотрение включается  $i$ -й участник ВХК (ресурс распределяется между  $i$  участниками), условный оптимальный выигрыш

$$D_i^* = \max \{ d_i(x_i^*) + D_{i-1}^*(\omega - x_i^*) \}. \quad (75)$$

Находим зависимости:

$$D_i^* = f(\omega), \quad (76)$$

$$x_i^* = g(\omega), \quad (77)$$

которые используют далее. Так, при включении в рассмотрение  $(i+1)$ -го участника условный оптимальный выигрыш:

$$D_{i+1}^* = \max \{ d_{i+1}(x_{i+1}^*) + D_i^*(\omega - x_{i+1}^*) \}. \quad (78)$$

При этом  $D_i^*(\omega - x_{i+1}^*)$  определяют по зависимости (76) (рис. 48), а  $d_{i+1}(x_{i+1}^*)$  — по зависимости (65).

Включив в рассмотрение последнего  $m$ -го участника ВХК, получим следующий условный оптимальный выигрыш:

$$D_m^* = \max \{ d_m(x_m^*) + D_{m-1}^*(W - x_m^*) \}. \quad (79)$$

При этом нет необходимости рассматривать несколько объемов  $W$ , а достаточно взять конкретное значение  $\omega = W$ , так как в рассмотрение включены уже все  $m$  участников, и нет необходимости в дальнейшем использовать зависимость  $D_m^* = f(\omega)$ .

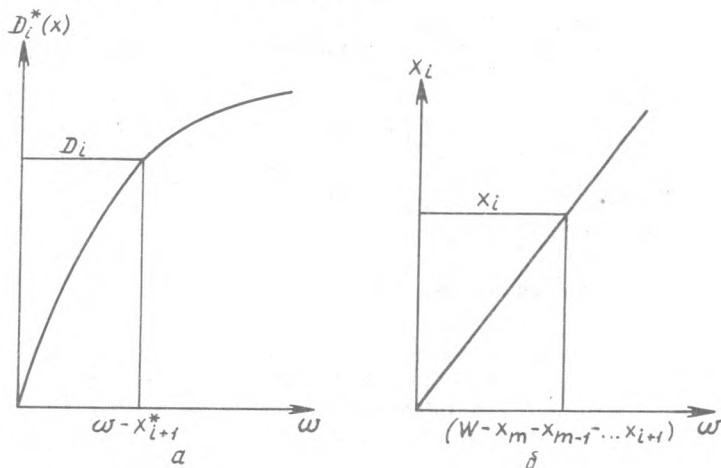


Рис. 48. Определение условного (а) оптимального выигрыша при распределении между участниками ресурса воды в объеме  $(\omega - x_{i+1})$  и безусловного (б) объема воды, выделяемого  $i$ -му участнику ВХК

Соотношения (67), (72), (74), (79) называют рекуррентными, так как они получены с использованием результатов предыдущих шагов оптимизации.

Безусловная оптимизация (т. е. определение значений  $x_i$ ) проводится следующим образом. Решение начинают с последнего участника, так как величину  $x_m^*$  можно принять за безусловную оптимальную, тогда суммарный доход  $D_m^*$  будет равен  $D$ , поскольку включены в рассмотрение все  $m$  участников, между которыми происходит оптимальное распределение ресурса  $W$ .

Для определения оптимального значения  $x_{m-1}$  необходимо использовать зависимость  $x_{m-1}^* = f(\omega)$ , полученную на  $(m-1)$ -м шаге оптимизации. При этом  $\omega = W - x_m$ .

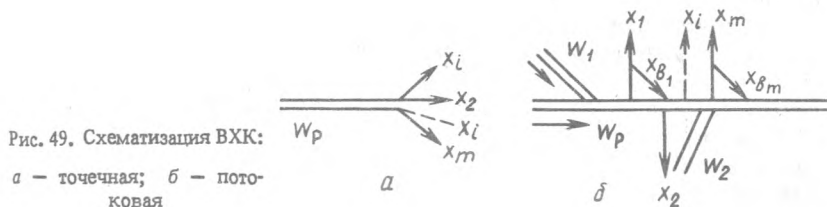
Вообще, для  $i$ -го участника ВХК безусловную величину выделяемого ресурса  $x_i$  вычисляют по зависимости (74) (рис. 48, б) для значения

$$\omega = W - x_m - x_{m-1} - \dots - x_{i+1}. \quad (80)$$

Значения безусловных объемов ресурсов, выделяемых каждому участнику ВХК, будут элементами решения задачи распределения водных ресурсов.

Поскольку подобные распределительные задачи необходимо решать для разных этапов управления (разных моментов времени), то размерность задачи становится очень большой, что не позволяет использовать рассмотренный алгоритм решения задачи распределения достаточно широко. Приходится упрощать задачу, объединяя участников в группы и укрупняя интервалы времени, что делает ее недостаточно адекватной действительности.

В рассмотренном примере задача распределения водных ресурсов решается для случая точечной схематизации ВХС (рис. 49, а). Если же принять потоковую схематизацию ВХС (рис. 49, б), то задача распределения еще более усложняется, поскольку необходимо учитывать объем возвращающихся после использования водных ресурсов  $x_b$ . Однако сохраняется основной принцип динамического программирования – проведение однотипных расчетов на каждом этапе оптимизации, отличающихся друг от друга числом рассматриваемых объектов, а также использование на каждом последующем этапе оптимизации результатов предыдущего этапа.



Наиболее близким к реальности является управление с использованием методов стохастического программирования, которое применяют, когда параметры целевой функции или ограничений либо те и другие – случайные величины, что как раз и свойственно ВХС.

Наиболее часто и успешно при управлении ВХС решают двухэтапные задачи стохастического программирования. На первом этапе определяют предварительный оптимальный план, при этом задача решается как детерминированная, решением ее является вектор с детерминированными компонентами. Затем вычисляют параметры системы и способ ее функционирования. На втором этапе решение корректируют в соответствии с реальными условиями.

При решении оптимизационных задач используют также методы теории графов, теории игр, теории массового обслуживания и т. п. Теорию графов применяют, если необходимо учесть перемещения потоков воды в системе, теорию массового обслуживания – существенную стохастичность задач управления ВХС, теорию игр – при выборе решения, если исходная информация содержит неопределенные факторы нестохастического вида, т. е. такие, вероятностные характеристики которых неизвестны.

Оптимизационными моделями пользуются при решении крупнорегиональных задач, например выбора варианта размещения водоемких производств, частных задач оперативного управления, для сужения спектра рассматриваемых альтернатив при имитационном моделировании. С усложнением систем применять оптимизационные модели стало трудно, так как приходится существенно упрощать их, а следовательно, получать приближенные решения. Поэтому появилась необходимость в использовании имитационного моделирования, где более широко представлено неформальное мышление специалистов в процессе принятия решений.

*Имитация* – это процесс управляемого эксперимента, проводимого на ЭВМ с моделью ВХС. Имитацию, как правило, проводят в тех случаях, когда аналитическое решение задачи управления невозможно, а непосредственное экспериментирование на реальной ВХС недопустимо или нецелесообразно. Подобная ситуация характерна для сложных ВХС, для которых трудно предсказать последствия тех или иных управляющих решений. Имитация позволяет прогнозировать поведение системы в различных условиях, проверить и оценить различные методы управления, обучить специалистов-водохозяственников управлению ВХС.

Имитационная система представляет собой набор следующих элементов: имитационной модели, банка данных, системы общения человека и ЭВМ.

*Имитационная модель* – это описание процесса функционирования ВХС на языке ЭВМ. При этом каждое состояние системы характеризуется своей комбинацией переменных, поэтому, изменяя переменные, можно моделировать переход систем из одного состояния в

другое. При статической имитации можно выбрать такое сочетание переменных, характеризующих систему, при котором она будет находиться в наиболее желательном состоянии, но необязательно в оптимальном. Динамическую имитацию используют для прогнозирования поведения системы в будущем при изменении условий ее функционирования или параметров.

При имитационном моделировании используют модульный принцип. При этом имитационную модель представляют как совокупность модулей (блоков, агрегатов), каждый из которых описывает функционирование отдельной части системы (подсистемы, элемента системы) с учетом связей, обеспечивающих взаимодействие между ними, в виде программы расчетов на ЭВМ на принятом алгоритмическом языке.

Так, при проведении водохозяйственных расчетов с помощью агрегативной имитационной модели ВХС бассейна р. Терек в модели ВХС выделены следующие элементы: "водохранилище", "створ", "генератор", "внешняя среда". Элемент "водохранилище" моделирует функционирование водохранилища в системе (описываются процессы сработки и наполнения), в элементе "створ" моделируется распределение воды между участниками ВХК, в элементе "генератор" – поступление водных ресурсов в систему, в модели "внешняя среда" описывается характеристика потока, выходящего за пределы системы.

Имитационная модель Азовского моря, разработанная в Ростовском государственном университете, состоит из следующих блоков: группы блоков для моделирования абиотических факторов (осадки, ветер, динамика вод и т. п.), группы блоков, описывающих кормовую базу (фитопланктон, зоопланктон, бентос), и группы блоков, моделирующих питание, рост, миграции и другие функции рыбных популяций (бычка, судака, леща и т. д.). Вместе с имитационными системами "Грубый прогноз", "Водные ресурсы суши" она образует семейство имитационных систем, предназначенных для исследования проблемы Азовского моря.

В имитационной модели осуществляется последовательность событий, соответствующих реальным операциям, проходящим в системе. При этом непрерывные процессы, происходящие в реальной системе, отображаются в дискретном виде. Модель, дискретизированная по времени, требует выбора определенного временного интервала (такта дискретизации)  $\Delta t$ . Такт может быть строго определенным или случайным (рис. 50). В первом случае (рис. 50, а) состояние системы описывается через одинаковое время, например через месяц, декаду. Если интервал очень короткий, то имитация занимает много времени для вычислений, при больших интервалах модель может оказаться неадекватной реальности. Выбор обычно зависит от скорости изменения входных данных или от уровня агрегатирования. Необходимо, чтобы не было слишком большого округления и в то же время излишних подробностей. Во втором случае переменные изменяются в определенные моменты имитационного времени, называемые момен-



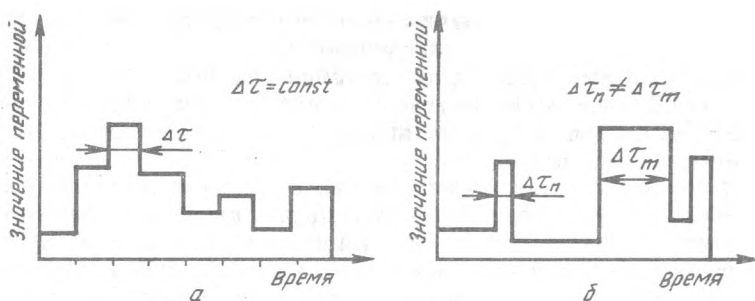


Рис. 50. Графическое представление изменения переменных при имитационном моделировании

тами свершения событий (рис. 50, б). Выбор такта зависит от типа решаемых задач.

В имитационной системе используются также вспомогательные модели (например, оптимизационные, теоретико-игровые и т. п.), необходимые для предварительного анализа системы с целью сужения числа рассматриваемых альтернатив.

Работа по постановке и проведению имитационного моделирования может быть разделена на следующие этапы: постановка задачи, назначение цели исследования, разработка модели системы, определение параметров управления, планирование эксперимента на ЭВМ при различных значениях управляющих параметров, эксперимент на ЭВМ, анализ результатов эксперимента и принятие решений.

Эксперимент заключается в поиске таких управляющих воздействий, которые обеспечат достижение поставленных целей управления. Проводят его в форме человеко-машинного диалога. Изменение управляющих параметров вызывает изменение результатов функционирования ВХС. Последние, полученные на ЭВМ, анализирует специалист, который принимает решение о дальнейшем изменении управляющих параметров. Процесс продолжается до тех пор, пока найденное решение не будет признано удовлетворительным. Таким образом, при имитации используют как формализованные методы, так и неформальное мышление лиц, принимающих решение.

Недостатки имитационного моделирования: необходимость использования значительного числа машинного времени для проведения экспериментов, сложность построения программного обеспечения, невозможность получения общего решения, поскольку решение всегда имеет частный характер, соответствующий фиксированным значениям параметров системы и начальных условий.

Примеры применения различных математических моделей при управлении ВХС рассмотрены в главах 4 и 6.

### 13. ПОСТРОЕНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ УПРАВЛЕНИЯ ВХС

При построении математической модели прежде всего необходимо расчленить систему на части и определить связи между ними. Систему можно изобразить графически (рис. 51, а) или в виде матрицы (рис. 51, б). Узлы на графе изображают элементы системы, связи указаны стрелками. В матрице числа, соответствующие элементам, располагают в строчку. В столбцах, соответствующих каждому элементу в строчке, расставляют номера элементов, на которые направлена связь от этого  $i$ -го элемента. Расчлененную систему можно несколько упростить, для чего выделяют подсистемы или совмещают некоторые элементы, а иногда последние можно исключить.

Затем выбирают структуру математической модели для описания полученной (упрощенной, схематизированной) системы. Структура модели – это совокупность связей между входными и выходными параметрами.

Построение математической модели – в некотором роде искусство, так как необходимо в каждом конкретном случае найти грань, отделяющую точность модели от излишней подробности в описании явления. Чем точнее модель, тем она адекватнее действительности. Но необходимо соизмерять точность и подробность модели с той точностью, с которой нужно знать решение, и с точностью информации, которой располагает исследователь, а также возможностями вычислительного аппарата.

Определяют числовые значения параметров (коэффициентов),

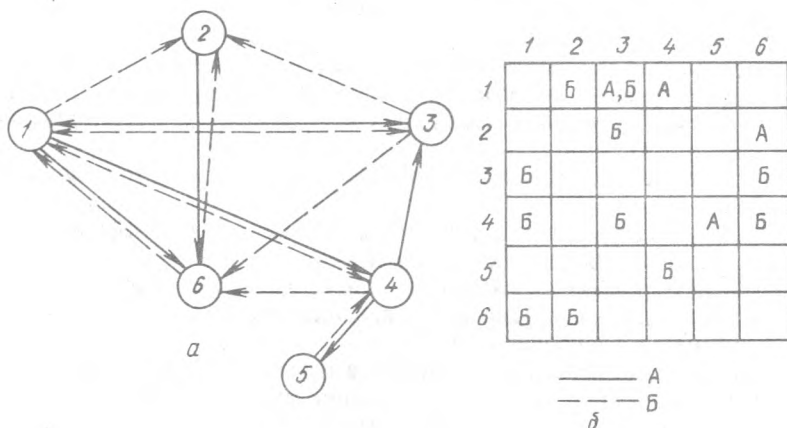


Рис. 51. Изображение системы:

$a$  – графическое;  $б$  – матричное;  $A, Б$  – связи материальная и информационная

входящих в модель, т. е. проводят идентификацию модели; проверяют соответствие модели моделируемому объекту.

Создание математической модели – ответственная часть процесса принятия решения, требующая глубокого знания математики и существа моделируемого процесса. Но при принятии решений лица, ответственные за это, должны учитывать наряду с рекомендациями, вытекающими из математического расчета, еще ряд факторов, которые трудно или невозможно описать математически. Поскольку на всех этапах анализа результатов математических расчетов и принятия решений требуется использование неформальных методов, необходимо присутствие человека даже при наличии полностью автоматизированной системы управления. Поэтому управление обычно базируется на человеко-машинном диалоге. Право окончательного выбора управляющего воздействия возлагается на лицо, принимающее решение (ЛПР).

#### 14. УЧЕТ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТЕЙ ПРИ УПРАВЛЕНИИ ВХС

Решение задач управления ВХС существенно усложняется из-за особенностей ВХС, перечисленных выше. Наибольшее влияние оказывают неопределенность исходной информации и противоречивость целей участников ВХС.

Основная цель управления ВХС – обеспечение рационального использования водных ресурсов для удовлетворения социальных и экономических потребностей общества при обязательном сохранении экосистем. Однако это слишком общее определение и оно не может быть непосредственно использовано при управлении ВХС. Поэтому возникает необходимость в конкретизации цели, т. е. декомпозиции на частные цели, совокупность которых и составляет общую цель функционирования ВХС. Анализ деятельности существующих ВХС позволяет выделить следующие частные цели (см. введение):

- обеспечение населения водой для питьевых и коммунальных нужд;

- получение производственного эффекта на предприятиях-участниках ВХС;

- водное благоустройство для получения социальных эффектов;

- обеспечение оборонных мероприятий;

- охрана окружающей среды от вредного воздействия вод;

- охрана водных ресурсов от загрязнения и истощения;

- сохранение и улучшение экосистем.

Анализ показывает, что некоторые из перечисленных целей противоречат друг другу, так как достижение максимума одной из целей уменьшает возможность получения максимального эффекта в достижении другой цели. Например, социальные и экономические цели иногда противоречат друг другу. Так, использование водохранилища для рекреации требует постоянства уровней воды в нем. В то же

время для получения пиковой электроэнергии уровни в водохранилище не могут оставаться постоянными, иначе не будет достигнута поставленная цель. Получение экономического эффекта при водопотреблении может повлечь за собой ухудшение качества воды и существующих экосистем. Максимум рекреационной вместимости также достигают за счет снижения показателей качества воды.

Так же как и цели функционирования ВХС, критерии оптимальности управления можно разделить на экономические и социальные. Для экономических процессов (получение производственного эффекта) наиболее часто в качестве критерия используют валовой доход, прибыль, объем валовой продукции, расчетные затраты, затраты труда, ресурсов, себестоимость продукции и т. п., для социальных – показатели качества воды, рекреационную ценность и вместимость водоемов и т. п.

Такая множественность критериев, из которых одни желательно обратить в максимум, другие – в минимум, характерная для задачи управления ВХС, также приводит к неопределенности.

Некоторые неформальные условия, которые нужно соблюдать при эксплуатации ВХС, трудно поддаются математическому описанию.

Все указанные обстоятельства создают необходимость поиска компромисса в принятии решений при управлении ВХС. Методы управления можно разделить:

на управление путем сравнения альтернатив по всему набору критериев и управление по единственному критерию.

**Первую группу методов** применяют при имитационном моделировании функционирования ВХС, которое широко используют при построении правил управления сложными ВХС, так как она позволяет учесть многие неформальные противоречивые условия функционирования ВХС и достичь компромисса между ними.

Имитационная система может содержать сотни параметров. Управления задаются в течение периода моделирования в многочисленные интервалы времени. Это требует большого числа экспериментов для рассмотрения всех возможных сочетаний параметров ВХС (вариантов управления или альтернатив).

Для сокращения числа рассматриваемых альтернатив можно воспользоваться методами теории исследования операций: определение области эффективных решений по методу Парето, выявления лучших альтернатив методом "электра", уменьшения рассматриваемых вариантов управления в результате применения методов эвристической самоорганизации.

Рассмотрим метод Парето. Основная идея этого метода – исключение из рассмотрения тех вариантов решения многокритериальной задачи, которые заведомо плохи. Это возможно, если определить область эффективных решений, или так называемую область Парето (по фамилии итальянского экономиста, предложившего этот метод в 1904 г.).

Предположим, что цели ВХС определяются двумя однозначными целевыми функциями, которые необходимо максимизировать:

$$\begin{aligned} F_1(x) &\rightarrow \max; \\ F_2(x) &\rightarrow \max. \end{aligned} \tag{81}$$

Если представить их графически (рис. 52, а), то для первой функции оптимальным будет решение  $x_1$ , для второй —  $x_2$ . Если эти функции имеют разные единицы измерений и их значения невозможно суммировать, то решение, которое одновременно максимизирует ту и другую целевую функцию, найти нельзя. Однако можно определить область эффективных решений, отбросив множество решений, заведомо неэффективных. В данной задаче множество эффективных решений расположено между точками  $x_1$  и  $x_2$ . Действительно, левее точки  $x_1$  всякое увеличение  $x$  одновременно увеличивает функции  $F_1(x)$  и  $F_2(x)$  вплоть до точки  $x_1$ . Следовательно, не имеет смысла искать эффективные решения левее точки  $x_1$ . Правее точки  $x_2$  всякое увеличение  $x$  уменьшает  $F_1(x)$  и  $F_2(x)$  одновременно, и, следовательно, правее точки  $x_2$  все решения неэффективны. Поэтому область Парето находится между точками  $x_1$  и  $x_2$ . Она обладает таким свойством, что в ней нельзя увеличить значение ни одного из максимизируемых критериев (улучшить решение), не ухудшив решения по другому из них.

Можно проиллюстрировать прием выделения паретовских решений на другом примере. Пусть требуется одновременно максимизировать два критерия —  $V_1$  и  $V_2$ . Если множество возможных решений  $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$  показать в плоскости критериев (рис. 52, б) в виде точек, координаты которых равны  $V_1$  и  $V_2$ , то можно получить область возможных решений  $G$  (заключенную внутри овала). Эффективные решения находятся на границе этого множества (дуга  $AB$ ).

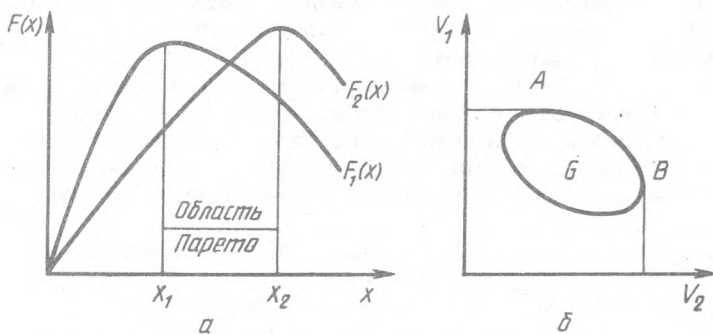


Рис. 52. Определение области эффективных решений:

$G$  — область возможных решений;  $AB$  — область эффективных решений

Принцип Парето, не выделяя единственного решения, существенно облегчает процедуру выбора эффективного решения, так как множество эффективных решений легче поддается анализу, чем все множество возможных решений. Окончательное решение можно выбрать на имитационной модели с привлечением неформальных методов.

При использовании для решения многокритериальной задачи управления метода последовательных уступок спектр рассматриваемых альтернатив сужается постепенно, вплоть до наиболее эффективного. Прежде всего экспертным путем проводится ранжирование критериев по важности. Сначала ищут решение, обращающее в максимум (минимум) наиболее важный критерий. Далее значение этого критерия фиксируется на некотором уровне, более низком (высоком), чем оптимум (максимум или минимум), на величину  $\Delta F$ . При этом ограничении рассматривают альтернативы, отвечающие такому условию, и ищут решение, обращающее в максимум (минимум) следующий предпочтительный критерий, который в дальнейшем фиксируется на некотором, отличном от оптимума уровне, и процесс оптимизируется по третьему критерию и т. д.

Полученное решение не является оптимальным ни по одному из критериев, но учитывает их все. Величину принимаемых уступок назначает эксперт. Обосновать их для каждого критерия можно в процессе предварительного изучения диапазона варьирования значений критериев при оптимизации по каждому из них отдельно.

Предположим, минимум расчетных затрат является, по мнению экспертов, важнейшим из критериев. Следовательно, необходимо вычислить затраты по всем вариантам решений и установить вариант с минимальными затратами  $Z_{\min}$ . Далее эксперты назначают уступки, например, в 10 % и рассматривают варианты решений, в которых расчетные затраты не превышают  $Z = Z_{\min} + 0,1 Z_{\min}$ . Остальные варианты решений не рассматривают. Среди выбранных вариантов выбирают тот, который является оптимальным по второму по важности критерию, например по показателю качества воды  $P$ . Определяют максимальное значение этого критерия в отобранных альтернативах  $P_{\max}$  и назначают очередную уступку по второму критерию. Отбирают альтернативы, которые имеют показатель качества воды не ниже чем  $P = P_{\max} - \Delta P$ , остальные не рассматривают. Среди отобранных альтернатив находят лучший по третьему критерию и т. д. Процесс отбора продолжают до тех пор, пока не рассмотрят альтернативы по всем критериям. Достоинство этого метода поиска компромиссного решения – возможность сразу видеть, ценой какой уступки в одном показателе получают выигрыш в другом и каков этот выигрыш.

Ранжирование критериев могут проводить непосредственно эксперты, либо применяя так называемый "треугольник Фуллера". Предположим, необходимо оценить альтернативы с помощью 5 критериев (экономическая эффективность, надежность эксплуатации,

экологическая обоснованность, рекреационная емкость, адаптивность к изменяющимся условиям). Сравним критерии попарно (первый со всеми остальными, второй с третьим, четвертый с пятым, третий с четвертым и пятым, четвертый с пятым) и для каждого подсчитаем число предпочтений. Тот критерий, который имеет наибольшее число предпочтений, будет иметь наивысший ранг. Формально все процедуры записывают в треугольник Фуллера (табл. 12). В первый столбец за-

12. Треугольник Фуллера

| Номер предпочитаемого критерия | Номер критерия | Число предпочтений критерия |
|--------------------------------|----------------|-----------------------------|
| 2, 3, 1, 1                     | 1              | 2                           |
| 2, 2, 2                        | 2              | 4                           |
| 3, 3                           | 3              | 3                           |
| 5                              | 4              |                             |
|                                | 5              | 1                           |

носят результаты сравнения критериев (номер критерия, которому отдается предпочтение). Так, записанные в первой строчке числа 2, 3 показывают, что при сравнении первого критерия со вторым предпочтение отдадут второму, при сравнении первого с третьим – третьему, последующие числа 1, 1 обозначают, что при сравнении первого критерия с четвертым и пятым предпочтение имеет первый критерий.

В третьем столбце суммируют предпочтения критериев, встречающихся во всех вышележащих строчках. В рассматриваемом случае наивысший ранг имеет критерий № 2, который имеет 4 предпочтения перед другими, далее критерии имеют следующий порядок: 3, 1, 5, 4.

Попарное сравнение несколько формализует процесс ранжирования критериев. Его можно использовать и при непосредственном сравнении альтернатив.

Наглядное представление о процессе принятия решений при сравнении альтернатив дают составление и анализ так называемого "дерева решений" (рис. 53), т. е. последовательного пересмотра всех вариантов решений. Для каждого варианта решения подсчитывают ценность  $C$ , которая равна произведению показателя эффективности варианта (исхода решений  $H$ ) и вероятности достижения этой эффективности  $P$ . При этом сумма вероятностей решений, принадлежащих последнему узлу расхождения ветвей дерева, равна единице. Тогда ценность этого узла – сумма ценностей вариантов решений, исходящих из него:

Рис. 53. "Дерево":

$D_1 \dots D_8; C_1 \dots C_4; B_1, B_2$  — ветви [ветви  $B_2, C_1, D_4$  и 6 вырублены (поставлен X)]. Наиболее эффективным является решение № 7 (показано двойной чертой); 1...19 — номера решений

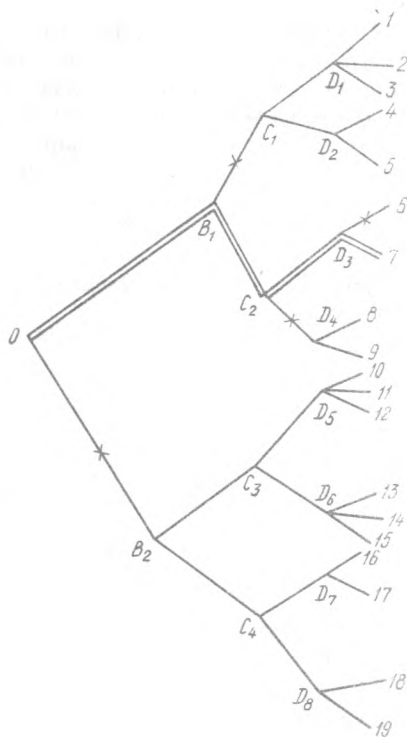
$$C_i = H_i P_i; \sum P_i = 1; U_i = \sum C_{ij}, \quad (82)$$

где  $i, j$  — индексы, обозначающие соответственно отдельный вариант решения и последний узел расхождения ветвей дерева (точки  $D_1, D_2, D_3, \dots, D_8$  на рисунке 53,  $U_{D_1} = U_1 + U_2 + U_3$ ).

При ходе назад ценность следующей точки  $U_{CK}$  назначают как максимальную из  $UD_j$ , принадлежащих узлу  $C_K$ . Так, согласно рисунку 53  $U_{C_1} = \max \{U_{D_1}, U_{D_2}\}$ . Аналогично назначают ценность следующего узла ответвления  $B$ .

Анализ вариантов решения начинают с рассмотрения ценностей точек  $B$ . Выбирают то разветвленное решение, исходящее из узла  $B$ , которое имеет большую ценность, остальные ветви, принадлежащие другому узлу, исключают и далее не рассматривают. Так, на рисунке 53 из двух спектров решений, принадлежащих двум узлам  $B_1$  и  $B_2$ , далее рассматривают лишь спектр решений, принадлежащий узлу  $B_1$ , который имеет большую ценность (если  $U_{B_1} > U_{B_2}$ , то все решения, принадлежащие узлу  $B_2$ , исключают). Далее рассматривают ценности узлов  $C_K$  и из этих узлов анализируют спектр решений, принадлежащих узлу  $C_2$ , имеющему наибольшую ценность; остальные ветви дерева решений исключают. Аналогично выбирают спектр решений, принадлежащих узлу  $D_3$ . Таким образом находят путь выбора альтернатив — по оставшимся ветвям, имеющим большую ценность в каждом узле ответвления.

К неформальным методам анализа в данном методе выбора эффективного решения относится построение дерева решений, т. е. нахождение всех возможных путей достижения поставленных целей, а также назначение вероятности достижения исхода в каждом варианте решения. Построение дерева решений полезно само по себе, так как позволяет не упустить из рассмотрения возможные пути достижения цели, в том числе и отказ от достижения цели, который, по крайней мере, ценен тем, что предупредит негативное воздействие на природу.





Следующий метод выбора решений при комплексном использовании водных ресурсов (минимаксный) связан со стохастичностью природного ресурса. При проектировании водохозяйственных объектов всегда есть риск несовпадения параметров внешней среды, принятых за расчетные, с реальными. Естественно стремление уменьшить его. Это можно сделать так. Составляют матрицу ущербов  $\|Y_{ij}\|$ , возникающих при несовпадении реальных параметров с расчетными (табл. 13).

13. Матрица ущербов при несовпадении расчетных параметров ВХС с эксплуатационными

|         | $\Pi_1$  | $\Pi_2$  | $\Pi_3$  | ... | $\Pi_n$  | Первый метод                            | Второй метод                           |
|---------|----------|----------|----------|-----|----------|---|--|
| $\Pi_1$ | 0        | $Y_{12}$ | $Y_{13}$ | ... | $Y_{1n}$ | $\max\{Y_{12}, Y_{13}, \dots, Y_{1n}\}$ | $\frac{Y_{12}+Y_{13}+\dots+Y_{1n}}{n}$ |
| $\Pi_2$ | $Y_{21}$ | 0        | $Y_{23}$ | ... | $Y_{2n}$ | $\max\{Y_{21}, Y_{23}, \dots, Y_{2n}\}$ | $\frac{Y_{21}+Y_{23}+\dots+Y_{2n}}{n}$ |
| $\Pi_3$ | $Y_{31}$ | $Y_{32}$ | 0        | ... | $Y_{3n}$ | $\max\{Y_{31}, Y_{32}, \dots, Y_{3n}\}$ | $\frac{Y_{31}+Y_{32}+\dots+Y_{3n}}{n}$ |
| $\Pi_n$ | $Y_{n1}$ | $Y_{n2}$ | $Y_{n3}$ | ... | 0        | $\max\{Y_{n1}, Y_{n2}, Y_{n3}, \dots\}$ | $\frac{Y_{n1}+Y_{n2}+Y_{n3}+\dots}{n}$ |

В первом методе выбора расчетных параметров принимают тот спектр параметров (иначе говоря, решение)  $\Pi$ , который приносит минимальный из максимальных ущербов при несовпадении параметров, принятых за расчетные, с реальными условиями функционирования, а во втором методе выбора – то решение  $\Pi_i$ , при котором среднее значение ущерба минимально.

При использовании этого метода правильнее рассчитывать ущербы с учетом вероятности наступления тех или иных реальных условий. В дальнейшем методика расчета такая же.

Следующий метод принятия решений при многокритериальном управлении применяют, если число критериев не превышает трех. В этом случае можно найти такой вариант управления, при котором выполняется следующее условие:

$$\left| \frac{F_1^* - F_1}{F_1^*} \right| = \left| \frac{F_2^* - F_2}{F_2^*} \right| = \left| \frac{F_3^* - F_3}{F_3^*} \right|, \quad (83)$$

где  $F_i^*$  – максимальные значения критериев;  $F_i$  – значение критерия в  $i$ -м варианте управления.

Таковы некоторые методы принятия решений при управлении ВХС, когда существует несколько критериев эффективности, которые не сводятся к одному критерию.

Вторая группа методов связана со сведением многоцелевых (многокритериальных) задач использования водных ресурсов к однокритериальным. Методы сведения следующие.

При линейной свертке критериев вместо частных критериев (социальных, экономических) рассматривают один линейный критерий:

$$F_j(x) = \sum_1^n C_i f_{ij}, \quad (84)$$

где  $F_j$  — эффективность некоторого  $j$ -го варианта решения;  $x$  — искомое решение;  $n$  — число целей;  $C_i$  — оценка значимости  $i$ -й цели;  $f_{ij}$  — оценка эффективности  $j$ -го варианта решения относительно  $i$ -й цели.

В каждом  $j$ -м варианте решения вычисляют эффективность решения относительно  $i$ -го критерия (цели) по формулам:

$$f_{ij} = \frac{z_i \max - z_{ij}}{z_i \max - z_i \min}; \quad (85)$$

$$f_{ij} = \frac{z_{ij} - z_i \max}{z_i \max - z_i \min}, \quad (86)$$

где  $z_i \min$ ,  $z_i \max$  — минимальное и максимальное значения показателя  $i$ -й цели, выбранные из всех вариантов решения;  $z_{ij}$  — показатель  $i$ -й цели в  $j$ -м варианте.

Показателями цели могут служить расчетные затраты, показатели качества воды, объемы продукции, показатели рекреационной емкости водоемов и т. п. В зависимости от того, минимальный или максимальный показатель является оптимальным, эффективность рассчитывают по формулам (85) и (86).

Оценивает значимость  $i$ -й цели эксперт или лицо, принимающее решение. При этом во всех вариантах решения оценка должна быть постоянной, а

$$\sum_1^n C_i = 1. \quad (97)$$

Решение заключается в выборе такого варианта, при котором критерий  $F_j(x)$  достигает своего максимума.

В некоторых случаях критерий можно рассчитать как среднее геометрическое или среднее гармоническое:

$$F_j(x) = \prod f_{ij} C_i; \quad (88)$$

$$F_j(x) = \frac{1}{\sum C_i / f_{ij}}.$$

Чаще пользуются методом выделения основного критерия. При этом среди критериев  $F_i(x)$  выделяют некоторый основной, например  $F_1(x)$ , и обращают его в максимум или минимум, т. е. находят такой вариант решения, при котором этот критерий достигает экстремально-

го значения. На все остальные критерии  $F_2(x), F_3(x), \dots, F_n(x)$  накладывают некоторые ограничения, т.е. вводят систему контрольных показателей  $F_i^*(x)$ , относительно которых критерии  $F_i(x)$  должны удовлетворять условиям:

$$F_i(x) > F_i^*(x); i = \overline{2, n}, \quad (89)$$

где  $n$  – число критериев.

Тогда задача сводится к однокритериальной:

$$F_1(x) \rightarrow \max \quad (90)$$

при ограничениях (89).

Компромиссом являются выбор главного критерия и назначение ограничений.

За основной чаще всего принимают экономический критерий, так как денежная единица является общей единицей измерения продуктов производственной деятельности человека. Цели, которые не могут быть выражены в стоимостном виде (такие социальные цели, как защита от наводнений, удовлетворение коммунально-бытовых потребностей, оборона страны, природоохранные мероприятия); учитывают как ограничения.

### *Контрольные вопросы и задания*

1. Чем ВХС отличается от водного хозяйства? Что такое функции ВХС?
2. Что является элементом ВХС? Куда ВХС входит как составная часть?
3. Какая управленческая структура соответствует ВХС: страны, региона, ВХК?
4. Зачем формулируются принципы управления?
5. Можно ли в управлении обойтись без моделирования ВХС?
6. Чем динамическая модель отличается от статической, имитационной?
7. Почему в ВХС необходимо присутствие лица, принимающего решения?
8. Что такое композиция, декомпозиция системы?
9. Что такое компромисс?
10. Если принятие решения есть определенность, то как принять решение в условиях неопределенности (попытайтесь привести какой-нибудь бытовой пример)?
11. Как бы вы назвали способ распределения водных ресурсов, когда каждая отрасль использует индивидуальную ВХС?

## **Глава 5**

### **ФОРМИРОВАНИЕ СТРУКТУРЫ ВХС**

#### **1.5. СОСТАВ ЗАДАЧ, РЕШАЕМЫХ ПРИ ФОРМИРОВАНИИ СТРУКТУРЫ**

Определить структуру проектируемой или развивающейся ВХС – это значит принять решение о размещении и параметрах водохранилищ, о составе, размещении и параметрах водохозяйственных объектов, необходимых для комплексного использования водных ресурсов

на рассматриваемой территории, на которой проектируется ВХС. Информацией для решения этих задач являются результаты решения задачи по определению состава участников ВХК. Эта задача, в свою очередь, базируется на результатах решения задач по размещению водоемких производств по территории.

Параметры водохозяйственных объектов зависят от мощности соответствующих участников ВХК, которых они обслуживают. Мощность участника (объем вырабатываемой электроэнергии, площадь орошаемых земель и т. д.) определяется объемом выделяемой этому участнику воды. Для получения этой информации необходимы расчеты годовых ВХБ, по которым определяют дефицитные по воде створы. Если отраслевые мероприятия по увязке ВХБ не ликвидируют этот дефицит, то необходимо рациональное распределение водных ресурсов между участниками ВХК.

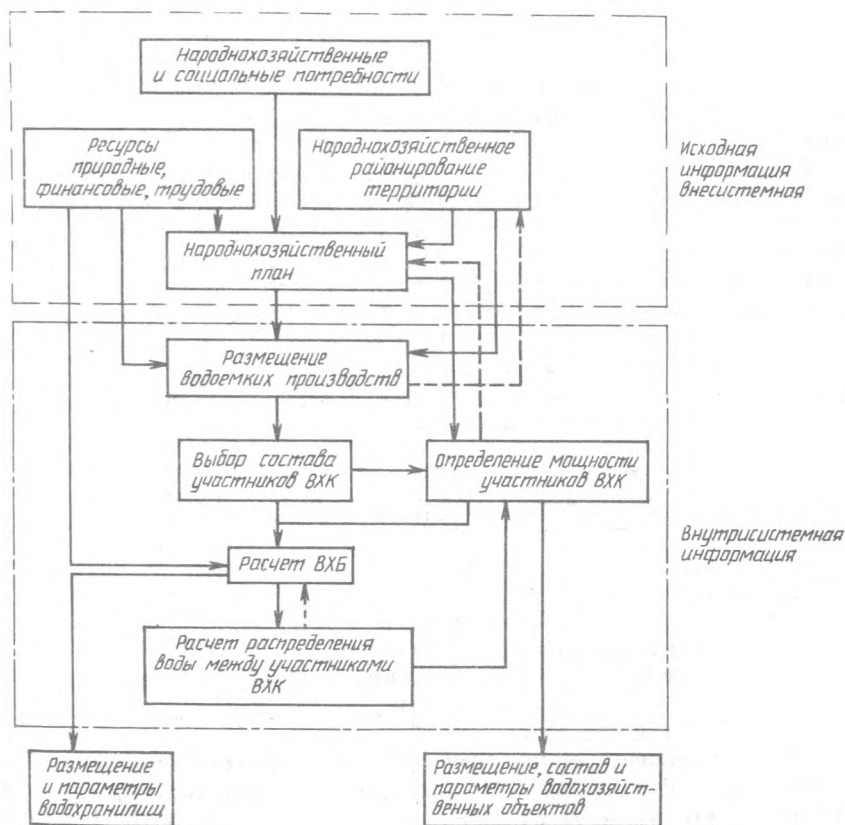


Рис. 54. Состав и последовательность задач, решаемых при формировании структуры ВХС

Расчеты ВХБ и определение мероприятий по их увязке также являются основой для решения задачи по определению параметров водохранилищ и их размещению по территории.

По результатам решения, на которых базировались условия задачи, корректируют эти условия, после чего задачи решают снова и снова корректируют, т. е. используют итеративный путь выбора наиболее эффективного решения (рис. 54). Этот же итеративный путь используется при согласовании результатов решения задач по выбору структуры ВХС разных уровней иерархии, т. е. при определении структуры регионального уровня. Но в то же время структуру бассейновой ВХС формируют на основе использования результатов решения задач по установлению структуры ВХС водохозяйственных районов, на которые разбит рассматриваемый бассейн. Поскольку водохозяйственный район – это участок территории бассейна, стабильные природные и хозяйственные условия, то составление модели и анализа водохозяйственной ВХС проще, чем бассейновой ВХС.

При принятии решений по формированию структуры развивающейся или вновь проектируемой ВХС необходимым условием является включение в состав ограничений требований экосистем, в том числе водных.

В зависимости от степени необходимой детализации и точности расчетов ВХС может быть представлена в виде точечной и потоковой схем. При точечной схеме основные характеристики района, включаемые в соответствующую модель (климатические, ресурсные и т. п.), предписываются одной точке, в которой как бы сосредоточивается весь район. При потоковой схеме учитывают пространственное размещение источников воды и ее потребителей, места забора и возврата, структуру перемещения воды.

Рассмотрим последовательно методы решения задач, результаты которых используют при формировании структур ВХС разного уровня иерархии.

## 16. РАЗМЕЩЕНИЕ ВОДОЕМКИХ ПРОИЗВОДСТВ

Цель решения задачи – выбрать из множества вариантов размещения водоемких производств такой, при котором затраты на производство заданных объемов продукции и водохозяйственное строительство будут минимальны.

Исходные данные содержат сведения о потребностях в различных видах продукции, о водных, земельных, трудовых ресурсах; экономические и экологические показатели.

Задача описывается моделями линейного программирования. В составе ограничений задания на производство отдельных видов продукции, ограничения на ресурсы, на затраты в водохозяйственное строительство и производство отдельных видов продукции, водобалансовые и экологические.

Задачу решают на разных уровнях иерархии (страны, региона, бассейна) для стадии долгосрочного планирования. Расчетный интервал планирования – год.

## 17. ОПРЕДЕЛЕНИЕ СОСТАВА УЧАСТНИКОВ ВХК

### 17.1. Методика решения задачи

Предпосылкой для решения задачи служит необходимость получения водоемкой продукции на территории, на которой предполагается размещение планируемой ВХС. Решение задачи базируется на результатах решения предыдущей задачи.

Основной принцип определения оптимальной структуры (состава участников) ВХК – выбор варианта с наименьшими затратами для народного хозяйства. При заданных объемах производства всех предполагаемых участников ВХК для определения оптимальной структуры последовательно сопоставляют между собой варианты при наличии и при отсутствии каждого компонента. При невключении соответствующей отрасли в состав участников ВХК продукция ее в том же постоянном объеме и качестве должна быть получена альтернативным путем.

Методической основой для выбора оптимального варианта из возможных альтернативных служит метод сравнительной экономической эффективности.

Допустим, имеется два варианта получения аналогичной продукции, например электрической энергии. В этом случае рассматривают вариант структуры ВХК, включающей гидроэлектростанцию, и вариант без нее. В другом случае предусматривают получение электрической энергии такой же выработки и мощности на тепловой электростанции, на строительство и эксплуатацию которой затрачивают соответствующие капитальные вложения и ежегодные издержки. Варианты отличаются размерами капитальных вложений и ежегодных издержек. Наиболее общим является случай, когда:

$$K_1 > K_2 \text{ и } C_1 < C_2, \quad (91)$$

где  $K_1$  и  $K_2$  – капитальные вложения соответственно в первом и втором вариантах ВХК;  $C_1$  и  $C_2$  – ежегодные издержки в тех же вариантах структуры ВХК.

В этом случае осуществление первого варианта потребует дополнительных капитальных вложений:

$$\Delta K = K_1 - K_2. \quad (92)$$

В то же время экономия ежегодных издержек составит

$$\Delta C = C_2 - C_1. \quad (93)$$

Для определения оптимального варианта структуры вычисляют коэффициент сравнительной экономической эффективности  $\epsilon$ , показы-

вающий величину ежегодных издержек, сэкономленных при использовании одного рубля дополнительных капитальных вложений:

$$\varepsilon = (C_2 - C_1) / (K_1 - K_2). \quad (94)$$

Величину, обратную коэффициенту сравнительной экономической эффективности, называют *сроком окупаемости дополнительных капитальных вложений*:

$$T_{\Delta K} = (K_1 - K_2) / (C_2 - C_1). \quad (95)$$

Вариант, характеризующийся большими капитальными вложениями (но меньшими ежегодными издержками), экономически более эффективен тогда, когда коэффициент сравнительной экономической эффективности  $\varepsilon$  больше его нормативной величины  $\varepsilon_n$  (срок окупаемости дополнительных капитальных вложений меньше нормативного), т. е.

$$(C_2 - C_1) / (K_1 - K_2) > \varepsilon_n. \quad (96)$$

При  $\varepsilon = \varepsilon_n$  равноэффективность обоих вариантов одинакова. Формула (92) может быть представлена в таком виде:

$$\varepsilon_n K_1 + C_1 < \varepsilon_n K_2 + C_2. \quad (97)$$

Двучлен  $(\varepsilon_n K + C)$  – *расчетные затраты* рассматриваемого варианта (приведенные к годовой размерности, т. е. р. в год):

$$Z_p = \varepsilon_n K + C. \quad (98)$$

Если использовать показатель нормативного срока окупаемости дополнительных капитальных вложений  $T_n^{\Delta K}$ , то из формулы (97) можно получить суммарные затраты, приведенные к размерности  $K$ :

$$Z_c = K + T_n^{\Delta K} C. \quad (99)$$

Последние можно представить графически (рис. 55). Отрезки  $OA$  и  $OB$  численно равны капитальным вложениям в оба варианта, тангенсы углов  $CAF$  и  $DBE$  – ежегодным издержкам, отрезки  $MC$  и  $MD$  – суммарным затратам соответственно для первого и второго вариантов. Случай, представленный на рисунке 55, а, соответствует условию (97).

Во втором случае (рис. 55, б) эффективность обоих вариантов равна, а третьем случае (рис. 55, в) эффективнее второй вариант (с меньшими капитальными вложениями), в котором экономия ежегодных издержек (в первом варианте) за нормативный срок окупаемости  $T_n^{\Delta K}$  не компенсирует дополнительные капитальные вложения (в том же варианте).

Нормативные коэффициенты сравнительной экономической эффективности определяют в соответствии с отраслевыми инструкциями. Например, для гидроэнергетики  $\varepsilon_n = 0,12$ , для орошения – 0,17... 0,33, для рыбного хозяйства – 0,17 и т. д. Для народного хозяйства в целом  $\varepsilon_n = 0,14$ .

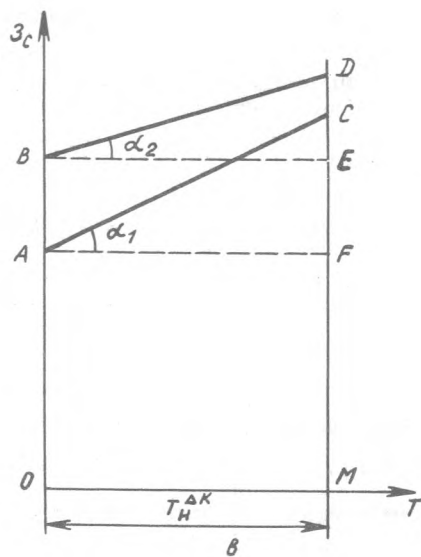
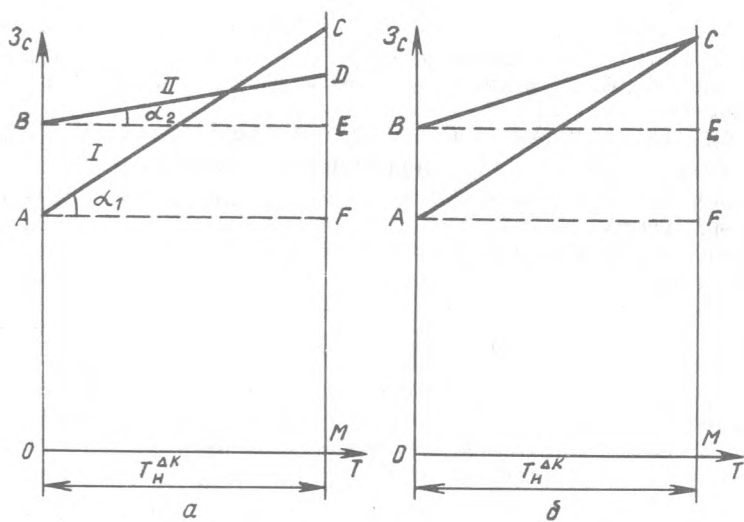


Рис. 55. Графическое представление суммарных затрат



Сравниваемые варианты обычно отличаются не только величиной затрат, но и сроками строительства и освоения проектных мощностей. Следовательно, в разных вариантах неодинаково проявляется отрицательный эффект замораживания затрат, т. е. временного изъятия их из оборота. Поэтому экономические расчеты проводят с учетом фактора времени. Если строительство ведут несколько лет, объекты вводят в эксплуатацию очередями, то в расчетах используют следующие показатели:

капитальные вложения  $\bar{K}$ , приведенные к одному и тому же году; ежегодные издержки  $\bar{C}$ , приведенные к установившимся; динамические приведенные затраты  $\bar{Z}$ , определенные с учетом фактора времени.

Эти показатели определяются следующим образом.

При замораживании капитальных вложений теряется некоторый экономический эффект из-за неполучения прибыли от них в течение периода замораживания. Эти средства в виде капитальных вложений прямо или косвенно (через социальный эффект) могли быть направлены в производство. Так как этого не происходит, то происходит потеря капитальных вложений  $\Delta K$ , которые в экономических расчетах начисляют на сумму замороженных капитальных вложений. Отрицательный эффект учитывают коэффициентом  $E_0$ :

$$\Delta K = KE_0, \quad (100)$$

где  $E_0$  — коэффициент учета фактора времени, численно равный прибыли, потерянной из-за замораживания одного рубля капитальных вложений на один год; в экономических расчетах принимают  $E_0 = 0,08$ .

Предположим, что капитальные вложения  $K$  провели за три года до получения от них прибыли. При этом потери их в первый год составят

$$\Delta K_1 = E_0 K. \quad (101)$$

На второй год замороженными окажутся капитальные вложения  $(K + \Delta K_1)$ , а потери составят

$$\Delta K_2 = E_0 (K + \Delta K_1). \quad (102)$$

Соответственно на третий год

$$\Delta K_3 = E_0 (K + \Delta K_1 + \Delta K_2). \quad (103)$$

Потери капитальных вложений от их замораживания за три года

$$\Delta K = \Delta K_1 + \Delta K_2 + \Delta K_3 = K [(1 + E_0)^3 - 1]. \quad (104)$$

Капитальные вложения вместе с начисленными на них потерями за три года замораживания

$$K + \Delta K = K (1 + E_0)^3. \quad (105)$$

Соответственно при замораживании капитальных вложений на  $p$  лет сумма их вместе с потерями, начисленными за период замораживания, составит:

$$K(1 + E_0)^n. \quad (106)$$

Капитальные вложения, необходимые для строительства, осваивают не все сразу, а распределяют по годам. Следовательно, капитальные вложения  $K_t$ , освоенные в разные годы, замораживают на разный период, зависящий от разницы между годом вложения и годом приведения, который для соблюдения условий сопоставимости разных вариантов должен быть для них всех одинаковым. Суммарные (за все годы строительства) приведенные капитальные вложения в водохозяйственный объект

$$\bar{K} = \sum_1^T K_t (1 + E_0)^{t_6 - t}, \quad (107)$$

где  $T$  — время строительства;  $K_t$  — капитальные вложения за год;  $t_6$  — год приведения (базисный год).

Обычно производственные мощности осваивают в течение нескольких лет. По мере освоения водохозяйственного объекта увеличиваются издержки по его эксплуатации. Зависимость для приведенных к установившимся ежегодным издержкам  $\bar{C}$  можно получить так же, как и для приведенных к одному году капитальных вложений:

$$\bar{C} = \sum_{t=t_3}^m \delta C_t (1 + E_0)^{t_6 - t}, \quad (108)$$

где  $t_3$  — первый год эксплуатации;  $m$  — срок изменения издержек (от начала эксплуатации объекта до его полного освоения);  $\delta C_t$  — приращение ежегодных издержек в году  $t$ .

Динамические приведенные затраты  $\bar{Z}$  имеют ту же структуру, что и расчетные затраты без учета фактора времени [см. формулу (98)], но в них учитываются приведенные капитальные вложения и ежегодные издержки:

$$Z = \bar{K} \epsilon_n + \bar{C}. \quad (109)$$

При сравнении оптимальным будет вариант, имеющий наименьшие динамические затраты, т. е.

$$\bar{Z} \rightarrow \min. \quad (110)$$

Во всех вариантах должны соблюдаться условия сопоставимости, т. е. должна быть получена продукция одинакового количества и качества, а затраты приведены к одному базисному году.

При расчете затрат предполагаемого участника ВХК учитывают не только его собственные отраслевые затраты, но и часть общих затрат комплексного гидроузла, которые приходятся на его долю. Методика определения этой доли комплексных затрат, приходящейся на каждого участника ВХК, рассмотрена ниже.

## 17.2. Распределение затрат ВХК между его участниками

В комплексном гидроузле плотина и образуемое ею водохранилище являются общими сооружениями для всех участников ВХК. Отраслевые сооружения (здание ГЭС, судоходный шлюз, водозабор и т. п.) предназначены для использования водных ресурсов соответствующей отрасли. Для реализации эффекта от использования воды необходимы также сопутствующие сооружения, связывающие водохозяйственный объект с соответствующей отраслью народного хозяйства, например линия электропередач, ирригационный канал, трубопровод, причальные сооружения, флот и т. п. Таким образом осуществляется связь водного хозяйства с энергетической, сельскохозяйственной, воднотранспортной системами, с промышленностью, коммунально-бытовым хозяйством и др.

Затраты на строительство и эксплуатацию общих сооружений, а также на компенсацию ущербов называют *общими* или *комплексными* затратами ВХК, а затраты на строительство и эксплуатацию отраслевых и сопутствующих сооружений – *отраслевыми* затратами; соответственно капитальные вложения и ежегодные издержки – комплексными и отраслевыми.

При строительстве ВХК его участники должны в той или иной мере компенсировать затраты.

На каждого участника ВХК должны быть отнесены собственные отраслевые и часть комплексных затрат:

$$K_j = K_{отрj} + K_{комj}; \quad (111)$$

$$C_j = C_{отрj} + C_{комj}; \quad (112)$$

$$Z_j = C_{отрj} + C_{комj} + E_n (K_{отрj} + K_{комj}), \quad (113)$$

где  $K_j$ ,  $C_j$ ,  $Z_j$  – соответственно капитальные вложения, ежегодные издержки и расчетные (приведенные) затраты  $j$ -го участника ВХК, которые определяют его участие в финансировании ВХК;  $K_{отрj}$ ,  $C_{отрj}$  – отраслевые капитальные вложения и ежегодные издержки  $j$ -го участника ВХК;  $K_{комj}$ ,  $C_{комj}$  – доля комплексных капитальных вложений и ежегодных издержек, относимая на  $j$ -го участника ВХК.

Для ВХК в целом

$$K_{ком} = \sum_{j=1}^n K_{комj}; \quad (114)$$

$$C_{ком} = \sum_{j=1}^n C_{комj}, \quad (115)$$

где  $n$  – число участников ВХК.

Таким образом, расчетные затраты на строительство и эксплуатацию ВХК

$$Z_{ВХК} = C_{ком} + \sum_{j=1}^n C_{отрj} + \epsilon_n (K_{ком} + \sum_{j=1}^n K_{отрj}). \quad (116)$$

Долю комплексных затрат, приходящуюся на отдельного участника ВХК, можно определить несколькими способами, например пропорционально объему воды, выделяемому этому участнику; или экономическому эффекту, получаемому им от использования воды. Наиболее простой – метод распределения затрат пропорционально объему воды, но его невозможно применять в тех случаях, когда в состав участников ВХК входят водопользователи (например, судоходство, гидроэнергетика и т. п.). Поэтому этот метод используют редко, например для гидроузлов, предназначенных для орошения и водоснабжения.

Наибольшее распространение получил метод распределения затрат по принципу равной экономической эффективности для всех участников ВХК. В этом случае принимают одинаковый для всех участников ВХК коэффициент эффективности капитальных вложений  $\mathcal{E}_p$ , либо коэффициент сравнительной эффективности  $\epsilon$ , либо коэффициент снижения расчетных затрат  $\alpha$ , относимых на отдельного участника, по сравнению с его заменяемым вариантом. Поскольку необходимо найти два неизвестных –  $K_{комj}$  и  $C_{комj}$ , то основное условие равной экономической эффективности дополняют условием пропорциональности ежегодных издержек  $C_{комj}$  капитальным вложениям  $K_{комj}$ . Это правомерно, так как издержки по комплексным объектам представляют собой в основном амортизационные отчисления. Поэтому можно считать, что

$$C_{комj} = p K_{комj} \quad (117)$$

где  $p$  – коэффициент пропорциональности,

$$p = C_{ком} / K_{ком} \quad (118)$$

**Распределение затрат ВХК по условию одинаковой рентабельности.** Условие одинаковой рентабельности предполагает равенство коэффициентов рентабельности каждого из участников ВХК коэффициенту его рентабельности в целом:

$$\mathcal{E}_{pj} = \mathcal{E}_{ВХК} \quad (119)$$

где  $\mathcal{E}_{pj}$  – коэффициент рентабельности  $j$ -го участника ВХК,

$$\mathcal{E}_{pj} = \frac{Ц_j - C_{комj} - C_{отрj}}{K_{комj} + K_{отрj}} \quad (120)$$

где  $Ц_j$  – стоимость продукции  $j$ -го участника ВХК;  $C_{комj}$ ,  $K_{комj}$  – доля ежегодных издержек и капитальных вложений, относимая на  $j$ -го участника ВХК;  $C_{отрj}$ ,  $K_{отрj}$  – отраслевые ежегодные издержки и капитальные вложения  $j$ -го участника ВХК.

Используя формулы (118) и (119), получим коэффициент рентабельности ВХК

$$\mathcal{E}_{ВХК} = \frac{Ц_j - p K_{комj} - C_{отрj}}{K_{комj} + K_{отрj}} \quad (121)$$

где неизвестна величина  $K_{\text{ком}j}$ .

Тогда

$$K_{\text{ком}j} = \frac{C_j - C_{\text{отр}j} - \varepsilon_{\text{ВХК}} K_{\text{отр}j}}{p + \varepsilon_{\text{ВХК}}}. \quad (122)$$

Коэффициент пропорциональности  $p$  определяют по зависимости (118). Долю комплексных ежегодных издержек  $C_{\text{ком}j}$ , относимую на  $j$ -го участника ВХК, вычисляют по формуле (117).

**Распределение затрат ВХК по условию равенства коэффициентов сравнительной экономической эффективности.** При распределении комплексных затрат по этому методу коэффициенты сравнительной экономической эффективности  $\varepsilon_j$  каждого из участников ВХК приравнивают к коэффициенту сравнительной экономической эффективности  $\varepsilon_{\text{ВХК}}$  ВХК в целом:

$$\varepsilon_j = \varepsilon_{\text{ВХК}}. \quad (123)$$

Коэффициент сравнительной экономической эффективности  $j$ -го участника ВХК вычисляют по формуле

$$\varepsilon_j = \frac{C_{\text{зам}j} - C_{\text{ком}j} - C_{\text{отр}j}}{K_{\text{ком}j} + K_{\text{отр}j} - K_{\text{зам}j}}, \quad (124)$$

где  $C_{\text{зам}j}$ ,  $K_{\text{зам}j}$  — ежегодные издержки и капитальные вложения в альтернативном варианте получения  $j$ -й продукции.

Если использовать зависимости (117), (123), получим

$$\varepsilon_{\text{ВХК}} = \frac{C_{\text{зам}j} - p K_{\text{ком}j} - C_{\text{отр}j}}{K_{\text{ком}j} + K_{\text{отр}j} - K_{\text{зам}j}}. \quad (125)$$

Откуда вычислим долю комплексных капитальных вложений, относимую на  $j$ -го участника ВХК,

$$K_{\text{ком}j} = \frac{C_{\text{зам}j} - C_{\text{отр}j} - \varepsilon_{\text{ВХК}} (K_{\text{отр}j} - K_{\text{зам}j})}{p + \varepsilon_{\text{ВХК}}}, \quad (126)$$

Долю ежегодных комплексных издержек, относимую на  $j$ -го участника ВХК,  $C_{\text{ком}j}$  определяют по формуле (117).

**Распределение затрат ВХК по условию одинакового коэффициента снижения расчетных затрат.** Коэффициент снижения расчетных затрат ВХК  $\alpha_{\text{ВХК}}$  показывает, во сколько раз затраты на строительство и эксплуатацию ВХК меньше затрат заменяемых объектов:

$$\alpha_{\text{ВХК}} = \varepsilon_{\text{ВХК}} / \sum_{j=1}^n \varepsilon_{\text{зам}j}, \quad (127)$$

где  $\varepsilon_{\text{ВХК}}$  — затраты ВХК;  $\sum_{j=1}^n \varepsilon_{\text{зам}j}$  — затраты по всем заменяемым объектам (с учетом их отсутствующих сооружений);  $n$  — число участников ВХК.

Для отдельного участника ВХК

$$\alpha_j = Z_j / Z_{\text{зам}j}, \quad (128)$$

где  $Z_j$  – расчетные затраты  $j$ -го участника ВХК;  $Z_{\text{зам}j}$  – расчетные затраты его заменяемого варианта.

При распределении комплексных затрат коэффициенты снижения затрат каждого из участников ВХК  $\alpha_j$  приравнивают к коэффициенту снижения расчетных затрат ВХК  $\alpha_{\text{ВХК}}$ :

$$\alpha_j = \alpha_{\text{ВХК}}. \quad (129)$$

Используя зависимости (113), (117), (128), (129), получим

$$K_{\text{ком}} = \frac{\alpha_{\text{ВХК}} Z_{\text{зам}j} - (C_{\text{отр}j} + E_n K_{\text{отр}j})}{\varepsilon_n + p}. \quad (130)$$

Двуучлен  $(C_{\text{отр}j} + E_n K_{\text{отр}j})$  – расчетные затраты на строительство и эксплуатацию отраслевых и сопутствующих сооружений. Обозначив его  $Z_{\text{отр}j}$ , получим

$$K_{\text{ком}j} = \frac{\alpha_{\text{ВХК}} Z_{\text{зам}j} - Z_{\text{отр}j}}{\varepsilon_n + p}. \quad (131)$$

При распределении комплексных затрат по условию равной эффективности могут встретиться случаи, когда  $K_{\text{ком}j} > 0$ ,  $K_{\text{ком}j} = 0$ ,  $K_{\text{ком}j} < 0$ . В первом случае  $j$ -й участник ВХК принимает на себя все свои отраслевые затраты и часть комплексных  $K_{\text{ком}j}$ , во втором – только отраслевые затраты. Если же при вычислении  $K_{\text{ком}j}$  окажется, что она имеет отрицательное значение, то для обеспечения равной экономической эффективности  $j$ -й участник ВХК принимает на себя лишь часть своих отраслевых затрат, а комплексных затрат не несет. Другую часть отраслевых капитальных вложений, равную  $K_{\text{ком}j}$ , и часть отраслевых ежегодных издержек, равную  $pK_{\text{ком}j}$ , распределяют между остальными участниками ВХК. Это малозффективные участники, имеющие до распределения комплексных затрат коэффициенты  $Z_j$ ,  $\varepsilon_j$ ,  $\alpha_j$ , меньшие, чем эти же показатели по ВХК в целом. К ним можно отнести, например, коммунально-бытовое водоснабжение.

**Метод дифференцированного распределения затрат.** В результате распределения комплексных затрат по этому методу участники ВХК могут иметь разную экономическую эффективность. При этом выделяют четыре группы участников ВХК:

существующие потребители воды;

неэффективные, но обязательные участники;

малозффективные участники, которые ухудшают экономические показатели ВХК;

высокоэффективные участники, которые улучшают экономические показатели ВХК.

Существующие до момента создания ВХК потребители воды, или участники первой группы, могут при его строительстве получать эффект или терпеть ущерб. В первом случае они несут определенные затраты и их включают в одну из последующих групп. Если же они терпят ущерб, то их включают в затраты комплекса.

Участники второй группы будут иметь нормативную эффективность, т. е.  $\varepsilon = \varepsilon_n$  или  $\alpha_j = 1$ , следовательно,

$$Z_j = Z_{замj} \quad (132)$$

Если использовать зависимости (113) и (117), то

$$C_{отрj} + pK_{комj} + \varepsilon_n (K_{отрj} + K_{комj}) = Z_{замj} \quad (133)$$

Откуда

$$K_{комj} = \frac{Z_{замj} - C_{отрj} - \varepsilon_n K_{отрj}}{p + E_n} = \frac{Z_{замj} + Z_{отрj}}{p + E_n} \quad (134)$$

На каждого участника третьей группы относят ту долю затрат, которая будет при включении его в состав ВХК. Показатели сравнительной эффективности этих участников

$$\varepsilon_{ВХК} \geq \varepsilon_j > \varepsilon_n \quad (135)$$

К четвертой группе участников можно применить принцип равной экономической эффективности. Они несут остальные затраты, т. е.

$$K_4 = K_{ВХК} - K_2 - K_3 \quad (136)$$

где  $K_{ВХК}$  — капитальные вложения ВХК (сумма отраслевых и комплексных);  $K_2$  — капитальные вложения, которые несут участники второй группы;  $K_3$  — то же третьей группы.

Расчеты доли комплексных затрат, относимой на  $j$ -го участника четвертой группы, проводят в такой последовательности.

Определяют коэффициент снижения расчетных затрат  $j$ -го участника ВХК, относящегося к четвертой группе:

$$\alpha_j = \frac{Z_{комj} + Z_{отрj}}{Z_{замj}} = \frac{K_{комj} E_n + pK_{комj} + Z_{отрj}}{Z_{замj}} \quad (137)$$

Необходимо найти коэффициент снижения расчетных затрат, подлежащих распределению:

$$\alpha_4 = (C_4 + K_4 \varepsilon_n) / \sum_{j=1}^n Z_{замj} \quad (138)$$

Приравняв  $\alpha_j = \alpha_4$ , вычисляют долю комплексных затрат, относимую на  $j$ -го участника четвертой группы:

$$K_{комj} = \frac{\alpha_4 Z_{замj} - Z_{отрj}}{\varepsilon_n + p} \quad (139)$$

Для участников четвертой группы  $\epsilon_j > \epsilon_{\text{ВХК}}$ .

**Распределение фактических затрат.** В рассмотренных выше методах распределяли динамические приведенные затраты (с учетом фактора времени), что необходимо в экономических расчетах. Фактическая доля комплексных капитальных вложений, относимая на  $j$ -го участника ВХК,

$$K_{\text{ком}j} = K_{\text{ком}} (\bar{K}_{\text{ком}j} / \bar{K}_{\text{ком}}), \quad (140)$$

где  $K_{\text{ком}}$  — фактические комплексные капитальные вложения;  $\bar{K}_{\text{ком}j}$  — доля приведенных комплексных капитальных вложений, относимая на  $j$ -го участника ВХК, которую вычисляют по зависимостям (122), (126), (131);  $\bar{K}_{\text{ком}}$  — приведенные комплексные капитальные вложения, определенные по зависимости (107).

### 17.3. Применение метода сравнительной экономической эффективности для выбора параметров комплексного гидроузла

Метод сравнительной экономической эффективности используют не только для определения состава участников ВХК, но и выбора параметров водохозяйственных объектов, например параметров комплексного гидроузла (подпорной отметки, вместимости водохранилища), руководствуясь при этом следующими соображениями.

Отметка нормального подпорного уровня НПУ определяет основные размеры сооружений, объем строительных работ, площади затоплений, которые увеличиваются с повышением НПУ. В то же время растет производственный эффект (выработка электроэнергии, площади орошаемых земель и т. п.). Необходимо рассмотреть не менее трех вариантов НПУ. При этом нижний предел возможного диапазона изменений НПУ определяется минимально допустимыми уровнями ирригационных водозаборов при самотечном орошении, необходимой мощностью гидроэлектростанций, судоходными глубинами, необходимой вместимостью водохранилища (для заданного вида регулирования стока). Верхний предел можно ограничить недопустимостью затопления ценных сельскохозяйственных угодий, крупных населенных пунктов, промышленных и транспортных объектов; топографическими или геологическими условиями створа плотины; подпором расположенного выше гидроузла; режим увеличением объема строительных работ.

Выбор полезного объема водохранилища также является сложной технико-экономической задачей. Полезный объем водохранилища, определенный при проведении гидрогеологических расчетов, обосновывают экономическими расчетами. При заданной отметке НПУ полезный объем водохранилища зависит от глубины сработки. С увеличением ее в большинстве случаев возрастает положительный эффект от более полного использования стока. Однако на гидроэнергетическом гидроузле с увеличением сработки выработка электроэнергии повышается лишь до определенного предела, что связано с увеличением



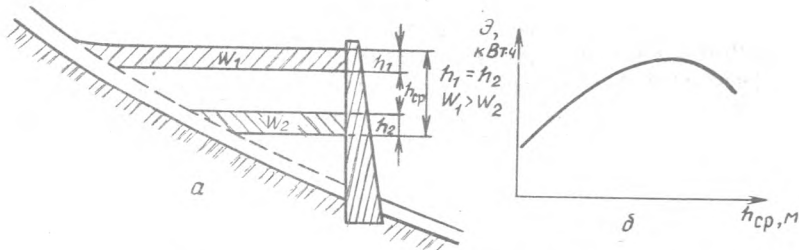


Рис. 56. Зависимость годовой выработки электроэнергии от глубины сработки водохранилища:

а — схема сработки водохранилища; б —  $Z = f(h_{cp})$

объемов воды, пропущенной через турбины. Но с увеличением сработки снижается напор, используемый на ГЭС. Причем по мере понижения уровня воды в верхнем бьефе напор уменьшается на одну и ту же величину  $h$  при все более снижающихся объемах воды, пропускаемых через турбины. Из двух противоположно направленных факторов (рост объемов воды и уменьшение напоров) второй по мере увеличения сработки начинает действовать сильнее (рис. 56).

Положительный эффект с ростом глубины сработки увеличивается с возрастанием объемов строительных работ, площадей затопляемых земель и т. д.

Экономический анализ заключается в сопоставлении затрат на получение одинакового объема продукции при разных вариантах технических решений. Например, при уменьшении отметки НПУ снижаются затраты на строительство плотины, компенсацию ущербов от затопления. Но так как снижается объем продукции, получаемой на объектах ВХК, необходимо предусмотреть получение недостающей продукции на других объектах народного хозяйства и эти затраты включить в общую сумму затрат варианта.

Каждый вариант обычно отвечает определенным сочетаниям параметров. Систему построения сетки вариантов принимают с учетом возможности рассмотрения всех анализируемых параметров.

## 18. ОПТИМИЗАЦИЯ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ВОДЫ МЕЖДУ УЧАСТНИКАМИ ВХК

### 18.1. Постановка задачи

Объем воды, выделяемой участнику ВХК, определяет его мощность, т. е. в конечном счете объем произведенной им продукции. Задача распределения водных ресурсов возникает при их дефиците, если ВХБ не удается увязать, применив мероприятия, рассмотренные в главе 3. Поэтому потребление воды уменьшают с наименьшим ущербом для народного хозяйства.

Для решения многоцелевой задачи водораспределения можно применять следующие методы:

оптимизацию водораспределения методом ранжирования водопотребителей;

оптимизацию водораспределения по экономическому критерию.

В первом случае дефицитную воду распределяют в соответствии с рангом водопотребителя. Ранжирование осуществляет эксперт.

Во втором случае при формировании структуры ВХК проводят плановую оптимизацию водораспределения по экономическому критерию, в качестве которого применяют один из следующих показателей: расчетные затраты участников ВХК, валовой доход, прибыль и т. п.

Если принять в качестве критерия расчетные затраты, то математическую модель плановой оптимизации водораспределения можно записать в следующем виде:

целевая функция

$$Z(x) = \sum_{i=1}^n Z_i(x_i) \rightarrow \min \quad (141)$$

при ограничениях:

$$\sum_i x_i = W;$$

$$x_i \in A;$$

$$P_i = P_{oi} + P_{di} = \text{const},$$

(142)

где  $Z(x)$  — суммарные затраты по всем видам продукции, в производстве которых участвует ВХК;  $Z_i(x_i)$  — функция затрат, связанная с производством  $i$ -й продукции в некотором объеме  $P_i$ ;  $x_i$  — параметр, характеризующий результат функционирования ВХК (например, объем водных ресурсов, выделяемый  $i$ -му компоненту ВХК);  $n$  — число участников ВХС;  $W$  — объем водных ресурсов, предназначенный для распределения между участниками;  $A$  — область допустимых значений  $x$ ;  $P_i$  — план производства  $i$ -й продукции;  $P_{oi}$  — объем производства  $i$ -й продукции на объекте ВХС, называемом основным, при выделении этому объекту (участнику) водных ресурсов в объеме  $x_i$ ;  $P_{di}$  — объем производства  $i$ -й продукции на дополняющих объектах, необходимый для компенсации снижения объема продукции, производимой на основных объектах, по сравнению с плановым объемом.

В качестве заданного планового объема продукции  $P_i$ , в производстве которого участвует  $i$ -й объект ВХС, может быть принят любой объем не меньше производительности данного объекта, но не более общего объема производства  $i$ -й продукции в целом по стране. В расчетах удобно рассматривать в качестве планового максимальный объем продукции, который может произвести  $i$ -й объект ВХК при выделении ему всего объема водных ресурсов  $W$ , предназначенного для распределения, т. е. при одноцелевом использовании водных ресурсов. Поскольку эта величина не является реальным планом, а лишь используется в оптимизационных расчетах, его можно назвать условным планом производства  $i$ -й продукции.

Предполагается также, что затраты на производство одного и того же объема продукции на объектах ВХК ниже, чем на дополняю-

щих, иначе при сравнении вариантов получения этой продукции (при формировании структуры ВХК) было бы принято решение о невключении этого компонента в состав ВХК и получении этого вида продукции более эффективным способом.

При оптимизации распределения воды между объектами ВХК предполагается, что выделенный  $i$ -му компоненту ВХК объем воды используется им оптимально, т.е. проводится также одноцелевая оптимизация функционирования рассматриваемого компонента ВХК. Например, оптимизируют распределение выделенного для орошения объема воды между орошаемыми участками при учете всех необходимых ограничений по виду производимой сельскохозяйственной продукции, производимых животноводства и т.д.

Функцию затрат  $i$ -го компонента ВХС  $Z_i(x_i)$  на производство условного плана продукции  $\Pi_i$  можно определить следующим образом:

$$Z_i(x_i) = Z_{oi}(x_i) + Z_{di}(x_i), \quad (143)$$

где  $Z_{oi}(x_i)$  – затраты  $i$ -го компонента ВХК на производство объема продукции на основных объектах при выделении ему водных ресурсов в объеме  $x_i$ ;  $Z_{di}(x_i)$  – затраты на производство  $\Pi_{di}$  объема  $i$ -й продукции на дополняющих объектах.

Затраты  $Z_{di}(x_i)$  на производство продукции на дополняющих объектах, необходимые для компенсации снижения ее объема, производимого на основных объектах при ограничении водных ресурсов, иначе

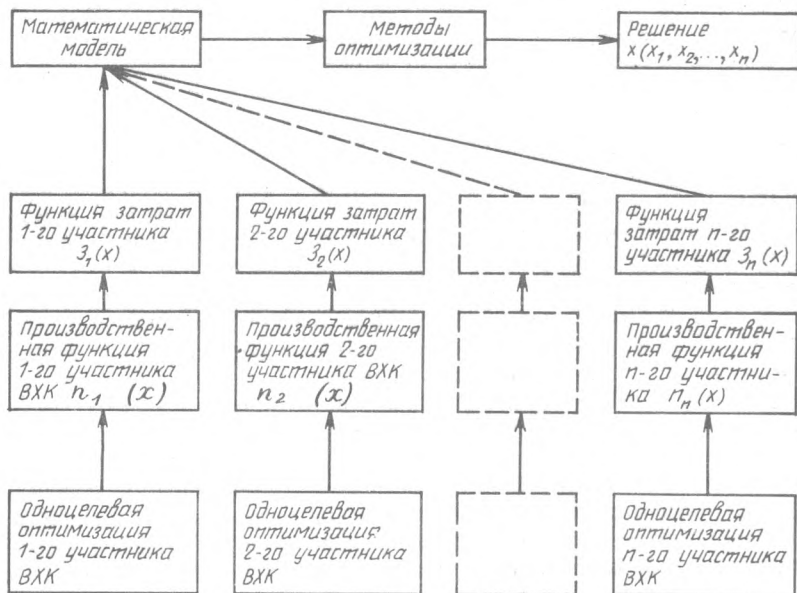


Рис. 57. Схема решения задачи оптимизации распределения воды между участниками ВХК

называют ущербами  $i$ -го компонента ВХК. Кроме способа оценки ущербов по методу компенсирующих затрат, принятой в вышеприведенной модели, существуют и другие, например оценка ущербов по стоимости потерянной при дефиците водных ресурсов продукции (в действующих оптовых или закупочных ценах) либо по величине дополнительных издержек производства при локализации дефицита самим предприятием (которому воду в нужном объеме не выделяют) за счет интенсификации производства.

Схема решения задачи оптимизации водораспределения приведена на рисунке 57.

## 18.2. Выбор заменяемых (альтернативных) вариантов

При выборе оптимального варианта структуры ВХК и оптимальных параметров водохозяйственных объектов необходимо включить в рассмотрение возможно большее число альтернатив, т. е. способов получения одной и той же продукции или одного и того же социального эффекта. Рассмотрим возможные альтернативные варианты для каждого из участников ВХК.

**Сельское хозяйство.** В аридной зоне получение урожая сельскохозяйственных культур невозможно без орошения. Поэтому в качестве заменяемого варианта можно рассматривать строительство специальных ирригационных водохранилищ, использование подземных источников воды, орошение сточными водами, усиление мер по более экономному использованию воды и т. д. либо мероприятия по получению эквивалентной сельскохозяйственной продукции в других бассейнах (с учетом транспорта продукции в рассматриваемый район).

В зонах неустойчивого увлажнения орошение служит средством повышения урожайности сельскохозяйственных культур. В качестве заменяемого варианта может быть получение урожайности за счет интенсификации сельскохозяйственного производства (например, улучшение агротехники) либо получение дополнительной продукции за счет освоения новых земель.

Альтернативами для сельскохозяйственных попусков воды из водохранилища, необходимых для обводнения пойменных лугов, являются заготовка других видов кормов, дополнительный накос трав в труднодоступных для машин местах и т. п.

**Гидроэнергетика.** В качестве энергоустановок, заменяющих ГЭС, применяют, как правило, тепловые электростанции ТЭС. При этом необходимы соблюдение балансов мощности и энергии в энергосистеме, учет специальных функций ГЭС в энергосистеме как высокоманевренных энергоустановок и обеспечение одинаковой надежности энергоснабжения.

ГЭС необходимо сопоставлять со специальными пиковыми ТЭС (например, газотурбинными), учитывая при этом, что по сравнению с ГЭС заменяющая ее ТЭС имеет больший расход электроэнергии на

собственные нужды, тогда

$$N_{ТЭС} = \varphi_N N_{ГЭС}; \quad (144)$$

$$\mathcal{E}_{ТЭС} = \varphi_{\mathcal{E}} \mathcal{E}_{ГЭС}, \quad (145)$$

где  $N_{ТЭС}$  и  $N_{ГЭС}$  — соответственно мощности ТЭС и ГЭС;  $\mathcal{E}_{ТЭС}$  и  $\mathcal{E}_{ГЭС}$  — выработка электроэнергии на ТЭС и ГЭС;  $\varphi_N$  и  $\varphi_{\mathcal{E}}$  — коэффициенты эквивалентности для мощности и выработки электроэнергии, принимают  $\varphi_N = 1,1 \dots 1,15$ ,  $\varphi_{\mathcal{E}} = 1,05$ .

При сравнении затрат на получение электроэнергии на ГЭС и на ТЭС учитывают топливный эффект ГЭС, заключающийся в экономии затрат на топливо:

$$Z_t = \mathcal{E}_{ТЭС} b c, \quad (146)$$

где  $b$  — удельный расход топлива на производство 1 кВт · ч электроэнергии;  $c$  — замыкающие затраты на топливо, складывающиеся из затрат на его добычу и транспортирование.

**Рыбное хозяйство.** В качестве заменяющих вариантов могут быть приняты следующие мероприятия: сооружение рыбоводных заводов, нерестово-выростных хозяйств, интенсификация рыбной ловли в других бассейнах (в том числе и на внутренних морях). Если при этом альтернативные объекты находятся в других районах, то учитывают разницу в транспортных затратах до места потребления.

**Водоснабжение.** Как альтернативу рассматривают варианты водоснабжения при отсутствии ВХК. Это может быть одноцелевой гидроузел на рассматриваемой или другой реке, водозабор в условиях свободной реки, водоснабжение из подземного источника, подвод воды из другого бассейна, опреснение морских вод, и т. п. Для промышленного водоснабжения это могут быть и другие варианты размещения промышленных предприятий, применение менее водоемких технологий, схем водоснабжения. Во всех случаях необходимо обеспечить надежность водоснабжения и качество воды.

**Водный транспорт.** Основным требованием для заменяемого варианта является обеспечение требуемого объема перевозок в те же расчетные сроки. При этом можно рассматривать водные перевозки в судоходных условиях без создания ВХК, обеспечение судоходных глубин за счет дноуглубительных работ, перевозки другими видами транспорта.

**Борьба с наводнениями.** Заменяемыми вариантами могут быть специальные гидроузлы, имеющие регулирующие водохранилища, защитные дамбы или другие инженерные сооружения, обеспечивающие защиту от наводнений с одинаковой степенью надежности.

Вариант, принятый в качестве заменяемого, должен быть наиболее экономичным из всех возможных.

### 18.3. Одноцелевая оптимизация использования воды участниками ВХК

Оптимизация распределения воды между участниками невозможна, если не проведена оптимизация использования ее отдельным водопотребителем. Для этого необходимо оптимально распределять выделенный водный ресурс между отдельными звеньями (моментами) технологического процесса рассматриваемого участника ВХК и т. д. Рассмотрим методы оптимизации использования воды некоторыми участниками ВХК.

**Орошаемое земледелие.** Земли, намечаемые к орошению, неравноценны с точки зрения эффективности их использования, что объясняется различием в типах почв, степени их засоленности, уровнях минерализации грунтовых вод, качестве агротехнического обслуживания. Все это непосредственно отражается на эффективности использования поливной воды и, следовательно, влияет на выбор объектов орошения. Кроме того, на эффективность влияет удаленность орошаемых массивов от трассы канала, что, в свою очередь, влияет на объем капитальных вложений по сооружению межхозяйственной оросительной сети и вызывает дополнительные потери воды при ее доставке на орошаемые земли. Поэтому необходим рациональный выбор орошаемых площадей в зоне действия крупного канала или другого водотока.

Порядок выбора можно принять следующий.

На каждом  $j$ -м объекте орошения для каждого  $s$ -го характерного года строят зависимость урожая каждой  $i$ -й культуры от оросительной нормы (см. разд. 9.2), определяя оптимальный режим орошения для различных оросительных норм. Формально задача оптимизации режима орошения (по Е. П. Галямину) может быть записана следующим образом:

$$Y_{ijs}(t) \rightarrow \max \quad (147)$$

при ограничениях:

$$0 \leq m \leq m_0; \quad \sum_0^T m(\tau) = M, \quad (148)$$

где  $Y_{ijs}$  — урожай  $i$ -й сельскохозяйственной культуры на  $j$ -м объекте орошения в  $s$ -й характерный год в конце вегетационного периода;  $m$  — поливная норма;  $m_0$  — максимально возможная поливная норма, выбираемая из условия сохранения плодородия почв, их впитывающей способности и влагоемкости, возможностей поливной техники;  $\tau$  — дата полива;  $M$  — оросительная норма.

Строят производственную функцию  $j$ -го объекта орошения для каждого из  $s$ -х характерных лет путем многократного решения задачи оптимизации распределения водных ресурсов между сельскохозяйственными культурами с использованием производственных функций этих культур, полученных на предыдущем этапе:

$$P_j = \max \sum_{i=1}^n (U_{ij} - C_{ij}) Y_{ij}(M_{ij}) \omega_{ij} \quad (149)$$

при ограничениях:

$$\sum \omega_{ij} = \Omega_j; \quad (150)$$

$$\sum (M_{ij} \omega_{ij}) / \eta = W_{js} \leq W_{js}^{\text{opt}}, \quad (151)$$

где  $n$  — число сельскохозяйственных культур в  $j$ -м объекте;  $U_{ij}$  — закупочная цена  $i$ -й культуры;  $C_{ij}$  — себестоимость  $i$ -й культуры, учитывающая затраты на агротехнические и внутрихозяйственные мелиоративные мероприятия;  $Y_{ij}$  — урожайность;  $\omega_{ij}$  — площадь, занятая  $i$ -й культурой на  $j$ -м объекте орошения;  $\eta$  — КПД межхозяйственных распределителей;  $W_{js}^{\text{opt}}$  — объем воды, выделяемый  $j$ -му объекту в  $s$ -й год;  $W_{js}^{\text{opt}}$  — объем воды, обеспечивающий для всех культур  $j$ -го объекта оптимальные оросительные нормы в  $s$ -й год.

На следующем этапе распределяют объем воды, подаваемой по каналу, между орошаемыми объектами для каждого  $s$ -го года и (предположим, что дефицит водопотребления не зависит от водности источника) для каждого  $z$ -го, характерного по водности источника года. Для  $s$ -го года водораспределение можно записать следующим образом:

$$P_s = \max \sum_{j=1}^m P_{js} \quad (152)$$

при ограничении

$$\sum W_{js} = W_{Kz}, \quad (153)$$

где  $P_s$  — прибыль, получаемая на всех объектах орошения в  $s$ -й год;  $m$  — число объектов;  $P_{js}$  — прибыль, получаемая на  $j$ -м объекте в  $s$ -й год;  $W_{Kz}$  — объем воды, переданный по магистральному каналу в  $z$ -й характерный по водности год.

Такие расчеты проводят для каждого из  $z$ -х годов.

Вычисляют среднюю многолетнюю прибыль  $j$ -го объекта орошения:

$$\bar{P}_j = \sum_i^s \alpha_s P_{js}, \quad (154)$$

где  $\alpha_s$  — вес  $s$ -го года в генеральной совокупности лет.

Далее определяют среднюю многолетнюю прибыль  $j$ -го объекта с учетом затрат в мелиоративное строительство и эксплуатацию:

$$\bar{P}_j^{\circ} = P_j - K/T - C, \quad (155)$$

где  $K$ ,  $C$  — капитальные вложения и ежегодные издержки на строительство и эксплуатацию межхозяйственной оросительной сети и канала, приходящиеся на долю  $j$ -го объекта (пропорционально площади орошения).

Затем вычисляют удельную среднегодовую прибыль с 1 га для каждого объекта и ранжируют их, выбирая те объекты, на которых среднегодовая прибыль выше принятой минимальной величины.

**Рыбное хозяйство.** При оптимизации использования водных ресурсов в рыбном хозяйстве учитывают следующие обстоятельства:

рыбное хозяйство может развиваться как в верхнем, так и в нижнем бьефах водохранилища;

как водопользователь рыбное хозяйство использует водные ресурсы совместно с другими водопользователями;

последствия неоптимального использования водных ресурсов рыбным хозяйством могут отражаться на его продуктивности в течение ряда лет.

Рыбохозяйственные попуски в нижний бьеф необходимы для обводнения нерестилищ. Графики этих попусков (величина расхода воды в определенные промежутки времени) зависят от вида рыб, имеющих промысловое значение в рассматриваемой реке. Поскольку эту же воду можно использовать для затопления заливных лугов, то при оптимизации имеет смысл рассматривать их совместно, разработав некий компромиссный график попусков воды в нижний бьеф. При этом необходимо учитывать, что весной вода нужна и для обводнения нерестилищ, расположенных в верхнем бьефе. Причем чем больше воды будет использовано для рыбохозяйственных попусков, тем меньше ее останется для обводнения верхних нерестилищ.

Математическая модель оптимизации использования воды рыбным хозяйством может быть записана в следующем виде:

$$(A^{ВБ} + A^{НБ})(x) \rightarrow \max \quad (156)$$

в том случае, если в верхнем и нижнем бьефах разводят рыбу одного вида либо одинаковой ценности.

В противном случае лучше искать максимум прибыли от реализации выловленной рыбы:

$$\left( \sum_1^m P_i^{ВБ} + \sum_1^n P_j^{НБ} \right) (x_k) \rightarrow \max, \quad (157)$$

где  $A^{ВБ}$ ,  $A^{НБ}$  — продуктивности рыб одного вида соответственно в верхнем и нижнем бьефах;  $P_i^{ВБ}$ ,  $P_j^{НБ}$  — прибыль от реализации рыб  $i$ -го или  $j$ -го вида, выловленных соответственно в верхнем или нижнем бьефе;  $x_k$  — управляемый параметр (обычно расход попусков) в  $k$ -м периоде времени;  $m$ ,  $n$  — число видов рыб, в верхнем и нижнем бьефах.

Период оптимизации зависит от вида рыбы.

#### 18.4. Производственные функции участников ВХК

Производственные функции представляют собой зависимость экономического эффекта (например, объема выпускаемой продукции) от сочетания влияющих на этот эффект факторов. Как правило, объем продукции является функцией многих переменных. Поскольку факторы, влияющие на производственный эффект, зачастую взаимосвязаны, то построить производственные функции чрезвычайно сложно. Поэтому практикуют способ построения производственных



функций путем определения частных сечений (т. е. однофакторных зависимостей) многофакторной зависимости по каждому фактору отдельно при фиксированных значениях остальных. Затем с использованием этих частных сечений строят многомерную производственную функцию.

Частное сечение производственной функции по водному фактору служит моделью водопотребления:

$$П = f(W), \quad (158)$$

где  $П$  — объем продукции;  $W$  — объем водных ресурсов, используемых для производства объема продукции  $П$ .

Объем  $W$  является фактором, который определяет степень участия отрасли народного хозяйства в проектируемой ВХС. В дальнейшем производственной функцией будем называть зависимость (158).

Под продукцией, производимой каждым участником ВХК, понимают весь материальный эффект, получаемый в результате деятельности этого участника, выраженный, например, количеством сельскохозяйственной продукции, выработанной электрической энергии, объемом перевезенных водным путем грузов, эффектом от предотвращения затопления и т. п. При этом учитывают то обстоятельство, что различные отрасли заинтересованы в использовании самых разных свойств воды.

Существенная особенность использования воды различными участниками ВХК — их различная реакция на ограничение воды в предыдущий и последующий моменты. Так, для гидроэнергетики количество электроэнергии, полученной в рассматриваемый момент, не зависит от объема воды. Для других участников ВХК объем продукции зависит от использования воды в течение длительного времени. Особенно хорошо это видно на примерах сельского и рыбного хозяйств. Урожайность сельскохозяйственных культур зависит не только от полива, проведенного в рассматриваемый период, но и от всех предыдущих и последующих поливов. Продуктивность в рыбном хозяйстве зачастую зависит от обводнения нерестилищ в предыдущие годы.

Поэтому главными факторами, определяющими экономическое содержание производственной функции и выбор независимой переменной, являются специфика производства продукции в различных отраслях народного хозяйства и характер использования водных ресурсов. Существенное значение имеют вид имеющейся исходной информации и существо решаемой задачи управления. Например, при решении оперативных задач управления в качестве материального эффекта можно использовать следующие показатели: приращение чистого дохода или продукции, ущерб от недодачи воды и т. п.

Производственные функции строят как для отдельного участника ВХК, так и для группы участников, объединенных для решения какой-либо задачи управления.

Производственные функции непостоянны, их периодически уточняют по мере изменения технологии производства, технико-экономических показателей, способов использования воды.

Производственную функцию каждого участника ВХК строят, предполагая, что водные ресурсы источников используются только в интересах этого участника, т.е. при одноцелевом использовании водных ресурсов. При этом прежде всего рассматривают предельные (т.е. максимальные и минимальные) варианты развития каждого участника ВХК.

Максимальный вариант развития участника ВХК определяется множеством факторов. Он зависит от наличия материальных и трудовых ресурсов, экономической целесообразности развития отрасли в составе конкретного ВХК и от других социальных и природных факторов. Например, предельный вариант развития оросительной системы зависит от располагаемых земельных ресурсов. При этом необходимо учитывать возможность увеличения земельных ресурсов за счет вовлечения непригодных в рассматриваемый момент земель (овражистых, с повышенным уклоном и т.п.), естественно, при экономической целесообразности данного мероприятия.

Согласно классификации С. Н. Крицкого и М. Ф. Менкеля можно выделить три типа производственных функций:

предельно жесткий, когда водопотребитель может выпускать продукцию только при получении воды в полном объеме, т.е. при расходе  $Q_{\max}$ ;

предельно гибкий, когда объем выпускаемой продукции пропорционален расходу воды, изменяемому от  $Q$  до  $Q_{\max}$ ;

промежуточный, когда выпуск продукции невозможен при расходе  $Q$ , меньшем некоторого предельного значения  $Q_{\min}$ , а в интервале  $Q_{\max} > Q > Q_{\min}$  объем выпускаемой продукции пропорционален расходу  $Q$ .

В соответствии с этой классификацией для водопотребителей первого типа минимальным является расход  $Q_{\max}$ , с уменьшением этого расхода полностью прекращается выпуск продукции (например, производство риса). Для водопотребителей третьего типа уменьшение расхода ниже  $Q_{\min}$  может привести к необратимым последствиям (например, в рыбном хозяйстве или в природе). Для водопотребителей второго типа минимальным является исключение из состава участников ВХК.

Математические модели, описывающие производственные функции по классификации Е. Б. Елоховского, могут быть двух типов:

во-первых, модели, названные физическими, достаточно строго описывающие процесс превращения используемой воды в соответствующую продукцию, — это производственные функции гидроэнергетики, полученные в результате водоэнергетических расчетов, орошаемого земледелия, основанные на использовании математических моделей формирования урожая сельскохозяйственных культур;

во-вторых, модели, описывающие количественную сторону этого процесса на основе имеющейся статистики наблюдений за управляющими воздействиями и соответствующими им значениями продукции, производимой этим объектом ВХК. Производственную функцию в этом случае строят в виде уравнения связи между входом (объемом воды) и выходом (объемом продукции). При этом используют следующие методы: классический регрессионный анализ, метод группового учета аргументов, а также некоторый промежуточный подход, при котором происходит перебор моделей из небольшого базисного набора. Точность и структура статистических производственных функций полностью зависят от точности и представительности исходных данных. Поэтому при наличии погрешностей в исходной информации невозможно достичь адекватного отражения механизма водопотребления, т. е. влияния входных данных на выходные. В этом отношении более точными являются физические модели. Однако при сложном характере объектов, когда нет точных зависимостей между элементами входа и выхода, статистические модели могут быть использованы при решении разного рода оптимизационных задач.

К указанным моделям двух типов можно добавить нормативные модели. Несмотря на то что они могли быть получены на основании физического или статистического подхода, их можно выделить в отдельную группу, так как нет необходимости в каждом отдельном случае тем или иным путем искать зависимость между объемом продукции и объемом воды, а можно воспользоваться имеющимися нормами (требуемым объемом воды на единицу объема соответствующей продукции).

Рассмотрим производственные функции отдельных участников ВХК.

**Орошаемое земледелие.** Конечным продуктом работы оросительной системы является сельскохозяйственная продукция, которая без орошения либо не может быть получена, либо может быть получена в существенно меньшем объеме (рис. 58).

Сложность построения производственной функции орошаемого земледелия заключается в том, что трудно выделить в каждый момент времени влияние каждого из факторов на урожай (климатических, почвенных, агротехнических и других факторов, обеспечивающих в



Рис. 58. Производственные функции орошаемого земледелия

1 — для гумидной зоны; 2 — для аридной.

совокупности жизнедеятельность растений). Кроме того, в рассматриваемый интервал времени урожай зависит не только от подачи воды в этом интервале, но также от количества воды, поданной в предшествующие и последующие периоды вегетации. Максимальную урожайность получают при оптимальных оросительных нормах, уменьшение нормы снижает влажность почвы, а увеличение нарушает воздушный, питательный и тепловой режимы, что снижает урожайность. Поэтому необходимо определить оптимальную норму для каждого поля в характерные по водности годы.

При построении производственных функций орошаемого земледелия большее распространение получили статистические методы. Применение физических методов затруднено, так как факторы, влияющие на формирование урожая, сложно моделировать из-за их стохастического характера. Этот способ построения производственных функций орошаемого земледелия имеет существенные недостатки: неучет неводных факторов и режима орошения приводит к большой дисперсии опытных данных, что затрудняет построение надежной аппроксимирующей зависимости. Поэтому эти зависимости имеют своеобразный вид. Производственные функции орошения, полученные разными авторами, имеют следующий вид:

$$\begin{aligned}
 S &= a_0 + a M; \\
 S &= a_0 + a_1 M + a_2 M^2; \\
 S &= a M^n; \\
 S &= a_0 \sum_{j=1}^n (a_j M_j + \theta_j M_j^2 + c_j \ln M_j); \\
 S &= a M / (a_0 + M)^2,
 \end{aligned} \tag{159}$$

где  $S$  — относительный урожай сельскохозяйственной культуры;  $M$  — оросительная норма;  $a_0, a_1, a_2$  — коэффициенты, зависящие от вида культуры  $j$ , географического положения оросительной сети, хозяйственных условий;  $n$  — количество сельскохозяйственных культур.

Функции носят локальный характер, и применяют их для оперативной оптимизации в конкретно складывающейся обстановке, близкой к той, при которой проводили эксперимент, позволивший набрать статистические данные.

Следующий способ построения производственных функций, основанный также на статистических методах, является более универсальным. Во-первых, зависимость строят от общего объема водного ресурса, затрачиваемого для получения урожая сельскохозяйственной культуры, что снижает влияние стохастического характера осадков, величины начальных влагозапасов, подпитки за счет грунтовых вод. Во-вторых, зависимости строят в нормированном виде по обеим координатам, что исключает влияние неводных факторов на искомую функцию. Производственная функция в этом случае имеет вид

$$\bar{S} = f(\bar{K}, \alpha_j), \tag{160}$$

где  $\bar{S}$  — относительный урожай,  $\bar{S} = U/U_{\max}$  ( $U, U_{\max}$  — урожаи соответственно при влагообеспеченности  $W$  и  $W_{\text{opt}}$ );  $\bar{K}$  — коэффициент влагообеспеченности,  $\bar{K} = W/W_{\text{opt}}$ ;  $\alpha_j$  — параметры, характеризующие темп увеличения или снижения урожая сельскохозяйственной культуры при увеличении влагообеспеченности.

Недостаток этого метода построения производственных функций — невозможность учета режима орошения.

Более перспективно использование физических моделей водопотребления, при которых учитывают физиологию потребления воды растением. Одна из таких моделей приведена выше [см. зависимость (22)].

Отдельную группу составляют физические модели, полученные на основе оптимизационных методов, используемых для рационализации водопотребления в орошении. При этом используют динамические модели формирования урожая сельскохозяйственных культур, которые учитывают влияние на урожай радиационного, температурного и водного режимов, уровня плодородия почвы, удобрений. Рассмотрим один из таких методов, основанный на решении задачи оптимизации режима орошения.

Сельскохозяйственный объект ВХК описывают как иерархическую систему. На верхнем уровне находится управляющий орган, в распоряжении которого имеются водные ресурсы, на нижнем уровне — отдельные поля, на которых выращивают сельскохозяйственные культуры, требующие орошения (рис. 59).

Производственные функции строят последовательно от низшего уровня управления к высшему, причем производственную функцию более высокого уровня строят на основе обобщения производственных функций более низкого уровня. Производственная функция, полученная на высшем уровне иерархии, и есть искомая функция сельскохозяйственного компонента ВХК.

Для построения производственной функции орошаемого поля решают назначения оптимального режима орошения при различных значениях выделяемого для этого поля объема водных ресурсов. Для этого разработана математическая модель формирования урожая агробиоценоза (сельхозкультуры), в которой рост растений за сутки описывают системой уравнений. Оптимальный режим орошения определяют как порядок распределения объема воды за период

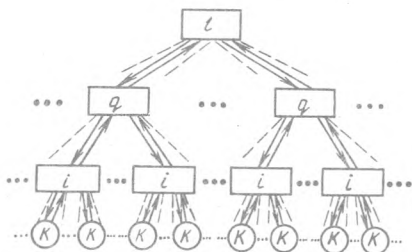


Рис. 59. Иерархическая структура сельскохозяйственного участника ВХС:

$K$  — сельскохозяйственное поле;  $i$  — низший управляющий орган;  $q$  — промежуточный управляющий орган;  $l$  — высший управляющий орган;  $\downarrow$  — управляющее воздействие;  $\uparrow$  — информация об эффективности использования воды

орошения, который дает максимум урожая при прочих равных условиях (тепловых, радиационных, агротехнических и т. п.). Полученная таким образом зависимость урожая от объема воды позволяет построить производственную функцию  $k$ -го поля:

$$П_k = f_k(W_k), \quad (161)$$

где  $П_k$  — прибыль, определяемая как разность между стоимостью продукции, выращенной на  $k$ -м поле, и затратами на ее производство,  $W_k$  — объем воды, выделяемый  $k$ -му полю.

Имея производственные функции каждого из полей, можно определить  $i$ -й управляющий орган (второго уровня управления, см. рис. 59), который распределяет воду между полями севооборота. Критерием оптимизации водораспределения является прибыль, получаемая от реализации продукции, выращенной на всех полях, подчиненных этому управляющему органу. Распределить воду необходимо так, чтобы получить максимум прибыли при некотором значении объема воды  $W_i$ , выделяемого  $i$ -му управляющему органу. Имея значения прибыли, получаемой при нескольких значениях выделяемых  $i$ -му органу объемов воды, можно получить значение производственной функции  $i$ -го органа:

$$П_i = f_i(W_i), \quad (162)$$

при

$$П_i = \sum_{k=1}^n П_k, \quad (163)$$

$$W_i = \sum_{k=1}^n W_k, \quad (164)$$

где  $n$  — число  $k$ -х полей, подчиненных  $i$ -му управляющему органу.

Проводя аналогичную процедуру оптимизации распределения воды между  $i$ -ми органами, можно получить производственную функцию более высокого уровня иерархии и, как результат, производственную функцию сельскохозяйственного участника ВХК.

**Рыбное хозяйство.** Оно использует воду для получения продукции во внутренних морях, реках, искусственных водоемах. Так, в водохранилище комплексного гидроузла разводят рыбу самостоятельно и как компонент сложного прудового хозяйства, специализирующегося на выпуске рыбной продукции. Необходим также попуск воды из водохранилища для затопления речных нерестилиц и поддержания благоприятного гидробиологического режима морей. Во всех случаях к уровням воды в водохранилище предъявляют определенные требования, регламентирующие условия обитания рыб в водохранилище и объемы необходимых попусков. Характерным и существенно осложняющим расчеты является то, что дефицит водопотребления сказывается в течение ряда лет и может проявиться не сразу (например, для осетровых — через 12...15 лет).

Многообразие видов использования воды в рыбном хозяйстве, естественно, ведет к многообразию производственных функций.

Производственные функции естественного воспроизводства в южных морях строят в виде зависимости промыслового возврата рыбы от объема весенних рыбохозяйственных попусков, необходимых для затопления нерестилищ и ската рыбной молоди в море (для проходных и полупроходных рыб). Однако промвозврат этих рыб зависит не только от объема весеннего рыбохозяйственного попуска, но также и от других факторов (чистота воды, количество поступающих в море биогенных элементов, соленость и уровень моря и т. д.). Большое значение имеют объем бытового речного стока, который во многом определяет величины перечисленных выше факторов, а также рыбобоводно-мелиоративные мероприятия, которые могут увеличить промвозврат рыбы при тех же объемах весенних попусков (очистка естественных нерестилищ, искусственное регулирование солености моря и т. д.).

В качестве ограничения сверху для производственных функций этого вида рыбного хозяйства могут выступать естественные и искусственные воспроизводства молоди. Ограничением сверху является тот минимальный объем воды, который необходим для сохранения рыбы как биологического вида.

Основной метод построения этих производственных функций – статистический, базирующийся на определении зависимости промыслового возврата рыбной продукции от объема воды путем анализа многолетней статистики наблюдений. Многие параметры при этом остаются неучитенными (температура воды, время подачи соответствующего объема воды, особенности биологии рыбы, природные условия водохранилища, условия предшествующего года, мелиоративные мероприятия, уровень биотехники, структура рыбного стада, условия нагула и т. д.) или учтенными в неявном виде, что в большой степени снижает возможности использования этих производственных функций. Поэтому более точными являются производственные функции, основанные на математических моделях, описывающих основные физические факторы, от которых зависит рыбохозяйственная продуктивность.

Так, для оценки влияния весеннего стока Волги на продуктивность рыбного хозяйства Каспийского моря В. П. Луферовым разработана математическая модель, использованная С. Б. Елаховским для оптимизации использования этого стока. В модели учитывается влияние режима и объема стока на условия нереста, кормовую базу и условия нагула. Схема влияния весеннего стока на промысловую продуктивность в Каспийском море для полупроходных рыб показана на рисунке 60. Трофическая цепь состоит из следующих звеньев: фитопланктон – водные беспозвоночные – рыба. Но условием развития фитопланктона является наличие в море биогенных веществ, к которым относятся соединения фосфора, кремния и азота. Около по-

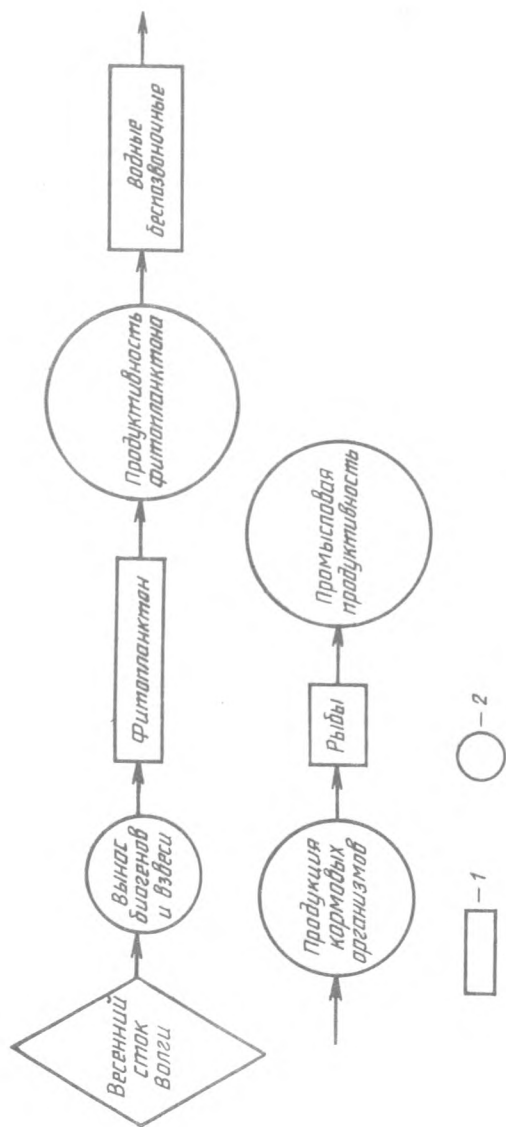


Рис. 60. Схема влияния весеннего стока на промысловую продуктивность полупроходных рыб:

1 — звенья трофической цепи; 2 — продуктивность



ловины этих веществ выносятся в море весенним половодьем. Кроме того, на биопродукционный процесс влияет наличие взвешенных веществ в воде, которые также выносятся речным стоком.

Для рыбного хозяйства в Азовском море может быть использована математическая модель, разработанная под руководством А. Б. Горстко. В модели детально рассмотрено влияние различных факторов на численность рыбных популяций (система пищевых взаимоотношений в море, продуктивность составляющих этой системы, динамика вод, ее качество и т. д.), в том числе и таких факторов, которые зависят от объема пресной воды, поступившей в море. В результате экспериментов на имитационной системе "Азовское море" была получена производственная функция рыбного хозяйства в Азовском море в виде зависимости численности популяции разных промысловых рыб от величины стока в море.

Рыбопродуктивность водохранилищ во многом зависит от режима использования их водных ресурсов. Выживаемость зимующей рыбы зависит от глубины зимней сработки, величины площади нерестилищ, глубины весенней сработки, а условия развития рыбы — от летней сработки. Колебания уровней воды в период нереста вызывают массовую гибель икры и личинок. При промысле рыбы в нижнем бьефе определяющее значение имеет величина площадей обводненных нерестилищ. Производственную функцию рыбного хозяйства в водохранилище строят как зависимость уловов от режимных характеристик водохранилища. Если промысел ведут только в нижнем бьефе, то производственная функция — зависимость площадей нерестилищ в нижнем бьефе от объема (и графика) рыбохозяйственных попусков. При промысле в обоих бьефах производственную функцию строят как зависимость дохода рыбного хозяйства от величины весеннего пуска.

Основной метод построения производственных функций рыбного хозяйства в водохранилищах — это статистический. Этим методом были получены производственные функции для рыбного хозяйства в днепровских водохранилищах. Причем регрессионные зависимости, полученные для разных водохранилищ, отличаются друг от друга не только коэффициентами, но и введенными независимыми переменными и даже структурой модели, что показывает необходимость их использования только в строго определенных условиях для конкретного водохранилища.

Подсчет объемов водопотребления и продуктивности рыбозаводных заводов возможен по действующим нормативам. Накоплен значительный проектный материал по прудовым рыбным хозяйствам в различных районах страны.

Таким образом, в зависимости от вида рыбного хозяйства можно применять тот или иной способ построения производственных функций.

**Водный транспорт.** К воднотранспортному участнику ВХК отно-

ются судоходство и лесосплав. Продукцией деятельности этого участника ВХК является объем перевезенных водным путем за навигацию грузов и сплавленного леса. Аргументом производственной функции может служить величина навигационного попуска в нижний бьеф гидроузла или глубина навигационной сработки водохранилища.

Требования водного-транспорта к режимам в период навигации сводятся к обеспечению расчетных глубин по всей трассе судового хода (как в водохранилищах, так и на незарегулированных участках) и расходов воды на шлюзование через гидроузлы. В межнавигационный период необходимо поддерживать уровни воды для нормального отстоя судов в затонах (чтобы суда не сядили на мель). Существуют внутриотраслевые противоречия между судоходством в верхнем и нижнем бьефах, между глубиной воды в нижнем бьефе и уровнями на пороге шлюза (увеличение объемов землечерпальных работ для увеличения глубин в нижнем бьефе может привести к просадке уровней на пороге шлюза).

Навигационные попуски обеспечивают возможность поддержания на судоходных участках реки гарантированных глубин. Чем больше гарантированная глубина, тем более крупные суда можно использовать для перевозки грузов. С ростом гарантированной глубины сглаживается неравномерность судоходной глубины в течение навигационного периода, что способствует более полному использованию провозной способности судов и позволяет работать портам с более равномерной нагрузкой. Все это способствует повышению объема перевозок и снижению себестоимости их. Надежность выполнения плана перевозок в значительной степени зависит от надежности поддержания гарантированной глубины.

Производственную функцию судоходства можно рассчитать по следующей схеме.

Грузоподъемность судна зависит не только от его типа, но и от степени использования расчетной грузоподъемности:

$$G = G_p \varepsilon, \quad (165)$$

где  $G$  — грузоподъемность при глубине  $H$ ;  $G_p$  — расчетная грузоподъемность судна, определяемая его типом;  $\varepsilon$  — степень использования расчетной грузоподъемности;

$$\varepsilon = (T_r - h_3 T_0) / (T_p - T_0), \quad (166)$$

где  $T_r$ ,  $T_0$ ,  $T_p$  — осадки судна соответственно при глубине  $H$ , порожнего, расчетная;  $h_3$  — необходимый запас глубины под днищем судна.

Осадки  $T_0$  и  $T_p$  определяются типом судна, а

$$T_r = aH, \quad (167)$$

где  $a$  — коэффициент, зависящий от типа судна.

В свою очередь, глубина является функцией следующих переменных:

$$H = f(Q, n_{ш}, K, \Phi, B, I), \quad (168)$$

где  $Q$  — расход в реке, определяемый как сумма бытового расхода в реке  $Q_б$  и расхода навигационного попуска  $Q_н$ ,

$$Q = Q_б + Q_н; \quad (169)$$

$n_{ш}$  — коэффициент шероховатости русла;  $K$  — коэффициент асимметричности русла;  $\Phi$  — морфометрическая функция;  $B$  — ширина судоходной прорези на реке;  $I$  — уклон реки.

Грузооборот на судоходной реке

$$P = \sum_{i=1}^m P_i L_i, \quad (170)$$

где  $P_i$  — объем перевозок  $i$ -го груза;  $L_i$  — расстояние перевозки  $i$ -го груза;  $m$  — число видов грузов, перевозимых по реке.

Объем перевозок  $i$ -го груза

$$P_i = \sum_{j=1}^m G_{ij}, \quad (171)$$

где  $G_{ij}$  — грузоподъемность  $j$ -го судна, перевозящего  $i$ -й груз;  $m$  — число судов, перевозящих  $i$ -й груз.

Рассматривая совместно зависимости (165)...(171), получим зависимость

$$P = f(Q_н), \quad (172)$$

которая может служить производственной функцией судоходства.

Очень часто производственную функцию судоходства строят в координатах

$$Z = f(Q_н), \quad (173)$$

где  $Z$  — расчетны затраты.

Расчетные затраты при этом складываются из путевой, флотской и портовой затрат, а также затраты на обеспечение гарантированной глубины путем проведения землечерпательных работ на перекатах (местах, где глубина реки наименьшая).

Производственные функции лесосплава также строят по зависимости (173).

**Гидроэнергетика.** Продукция гидроэнергетики — это вырабатываемые гидрогенераторами ГЭС мощность и объем электроэнергии.

Мощность

$$N = N_{баз} + N_{пик} \quad (174)$$

где  $N_{баз}$ ,  $N_{пик}$  — базисная и пиковая мощности.

*Базисная мощность* вырабатывается за счет объемов воды, проходящих через турбины ГЭС в постоянном режиме. К таким объемам можно отнести санитарные попуски воды из верхнего бьефа водохранилища в нижний, рыбохозяйственные, сельскохозяйственные, на-

вигационные попуски, которые осуществляют за определенный интервал времени в постоянном режиме, т. е. без изменения величины объема воды, проходящей через турбины за достаточно большой отрезок времени (месяцы и более). Эти объемы не подлежат перераспределению в течение суток в соответствии с потребностями энергосистемы.

Пиковая мощность может быть получена за счет объемов воды, которые могут быть перераспределены в течение суток в интересах потребителей электрической энергии. Поскольку, как указывалось выше, получение электроэнергии за счет воды — это процесс малоинерционный в отличие от теплоэнергетики, то получение пиковой мощности — одна из основных функций гидроэнергетики. При этом суточную энергию воды по часам суток распределяют следующим образом.

Пусть необходимо распределить по часам суток энергию  $\mathcal{E}_{\text{сут}}$ . Это значит, что необходимо найти такую площадь в пиковой части суточного графика нагрузки энергосистемы, которая по величине равна  $\mathcal{E}_{\text{сут}}$ . Для нахождения этой площади можно воспользоваться вспомогательной кривой, которую называют анализирующей (рис. 61, а). Это зависимость электроэнергии от мощности  $\mathcal{E}_{\text{сут}} = f(N)$ , обладающая тем свойством, что площадь части суточного графика нагрузки энергосистемы (рис. 61, б), расположенная между линиями, проходящими через точки, соответствующие энергии  $\mathcal{E}_1$  и  $\mathcal{E}_2$  на анализирующей кривой, численно равна энергии  $\Delta\mathcal{E} = \mathcal{E}_2 - \mathcal{E}_1$ .

Это свойство анализирующей кривой позволяет найти на суточном

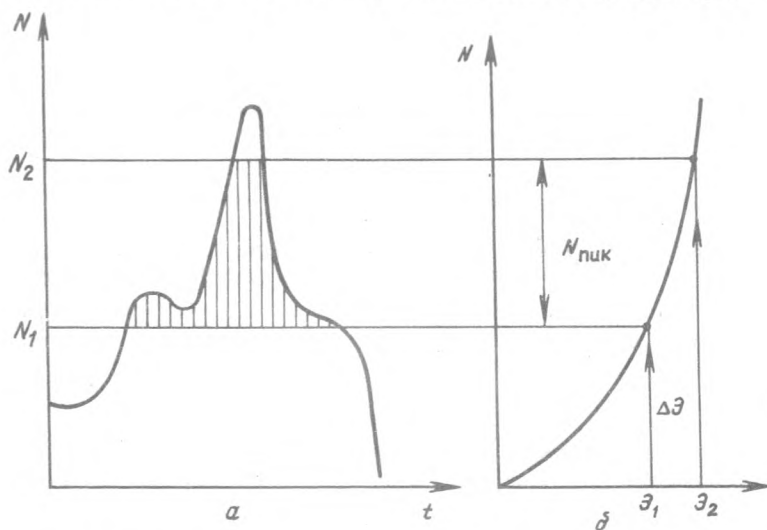


Рис. 61. График нагрузки энергосистемы (а) и анализирующая кривая (б)

графике нагрузки энергосистемы ту ее часть, площадь которой численно равна величине суточной электроэнергии. Мощность, соответствующая энергии  $\mathcal{E}_{сут}$ , иначе называют рабочей гарантированной.

$\mathcal{E}_{сут}$  определяют в такой последовательности.

Суточную электроэнергию в  $i$ -е сутки вычисляют по зависимости

$$\mathcal{E}_{сутi} = N_i \tau, \quad (175)$$

где  $N_i$  — мощность водотока в  $i$ -е сутки;  $\tau$  — число часов в сутках.

Мощность водотока  $N_i$  можно определить по зависимости (см. главу 3). При этом расход  $Q_i$  и напор  $H_i$  зависят от вида регулирования стока, принятого на комплексном гидроузле.

При годичном регулировании стока расход

$$Q = W_{ГЭС} / \tau, \quad (176)$$

где  $W_{ГЭС}$  — годового объем воды, выделяемый на нужды гидроэнергетики;  $\tau$  — число секунд в году.

При суточном регулировании стока расход  $Q_i$  равен расходу гидрографика за вычетом расходов, выделяемых другим участникам ВХК.

Напор, как известно, — разность уровней воды в верхнем и нижнем бьефах:

$$H_i = \nabla ВБ_i - \nabla НБ_i. \quad (177)$$

Уровень воды в верхнем бьефе зависит от объема воды в водохранилище  $V_i$ :

$$\nabla ВБ_i = f(V_i). \quad (178)$$

В свою очередь, объем воды в водохранилище — величина переменная и для каждого момента времени ее определяют по уравнению ВХК

$$V_i = Q_i t - W_i - W_{попi} + W_{ввi}, \quad (179)$$

где  $Q_i$  — расход гидрографа;  $W_i$  — объем воды, выделяемый другим участникам ВХК с учетом потерь;  $W_{попi}$  — объем попусков воды в нижний бьеф;  $W_{ввi}$  — объем возвратных вод;  $t$  — время.

Уровни воды в нижнем бьефе зависят от величины расхода, поступившего туда в  $i$ -й момент времени:

$$\nabla НБ_i = f(Q_i^{НБ}). \quad (180)$$

На основании расчетов с использованием зависимостей (174)...(180) можно получить несколько среднесуточных энергий  $\mathcal{E}_{сут}$ , из которых необходимо выбрать одну. Для этого проводят оптимизационные расчеты, где за критерий оптимизации принимают какой-либо экономический показатель (сумма доходов всех участников ВХК, расчетные затраты на получение плановых объемов продукции всех

участников). При предварительных расчетах по распределению дефицитной воды между участниками ВХК можно принять  $\mathcal{E}_{сут}$ , построив кривую обеспеченностей среднесуточных энергий, мощностей либо напоров и, приняв какую-либо обеспеченность за расчетную, выбирают  $\mathcal{E}_{сут}$  (рис. 62).

При определении базисной мощности расход  $m$  равен расходу постоянный попусков, а напор можно принять по кривой обеспеченности среднесуточных напоров для заданной обеспеченности. Таким образом, базисную мощность подсчитывают по зависимости

$$N_{\text{баз}} = 98,1 Q_{\text{п}} H_{\text{р}} \eta_{\text{а}}, \quad (181)$$

где  $Q_{\text{п}}$  — расход попусков в нижний бьеф (кроме тех, за счет которых была получена пиковая мощность);  $H_{\text{р}}$  — напор, выбранный по кривой обеспеченности;  $\eta_{\text{а}}$  — КПД агрегатов.

При построении кривой обеспеченности напоров пользуются зависимостями (175)...(180).

Годовая выработка электроэнергии

$$\mathcal{E}_{\text{год}} = \sum N_i \tau_i, \quad (182)$$

где  $N_i$  — мощность в  $i$ -м месяце, определяют по зависимости (175);  $\tau_i$  — число часов в  $i$ -м месяце.

Таким образом, при построении производственных функций ГЭС используют физические и оптимизационные методы. При этом учитывают не только количество произведенной электроэнергии, но и особые функции ГЭС в энергосистеме как высокоманевренной установки, что позволяет использовать ее для покрытия пиков графиков нагрузки энергосистемы. Поэтому мощность ГЭС зависит не только от объема и напора воды, но и от конфигурации части суточного графика нагрузки энергосистемы, покрываемой за счет ГЭС.

Необходим также учет вида регулирования стока, проводимого на гидроузле, а также того обстоятельства, что ГЭС является элементом другой системы — электрической, поэтому в ответственных случаях задача оптимизации режимов работы ГЭС, являющейся основой для получения производственной функции гидроэнергетики, решается совместно с проблемой оптимального управления режимами энергетической системы.

## 19. СХЕМА РАСЧЕТОВ ПО ОБОСНОВАНИЮ РАЗВИТИЯ ВХС

Для решения задачи обоснования варианта развития ВХС необходимо совместно использовать приведенные выше локальные модели, позволяющие решить отдельные подзадачи. Для примера при-

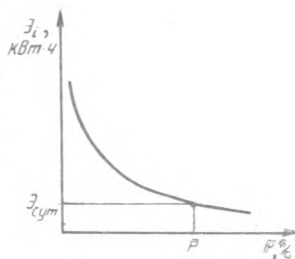


Рис. 62. Кривая обеспеченности  $\mathcal{E}_i = f(P)$

ведем блок-схему расчетов по обоснованию развития ВХК (рис. 63). Для решения задачи проводили совместное использование оптимизационной и имитационной моделей, а также инженерные методы водохозяйственных расчетов. Принята потоковая схематизация ВХС, представленная в виде графа, каждая вершина которого – водохозяйственный створ, и дуга – водоток или водопользователь. В створе могут находиться водохранилища, места забора или возврата воды или притока.

Сначала на имитационной модели рассчитывают перспективный ВХБ для определения дефицитных створов. Имитируют функциони-

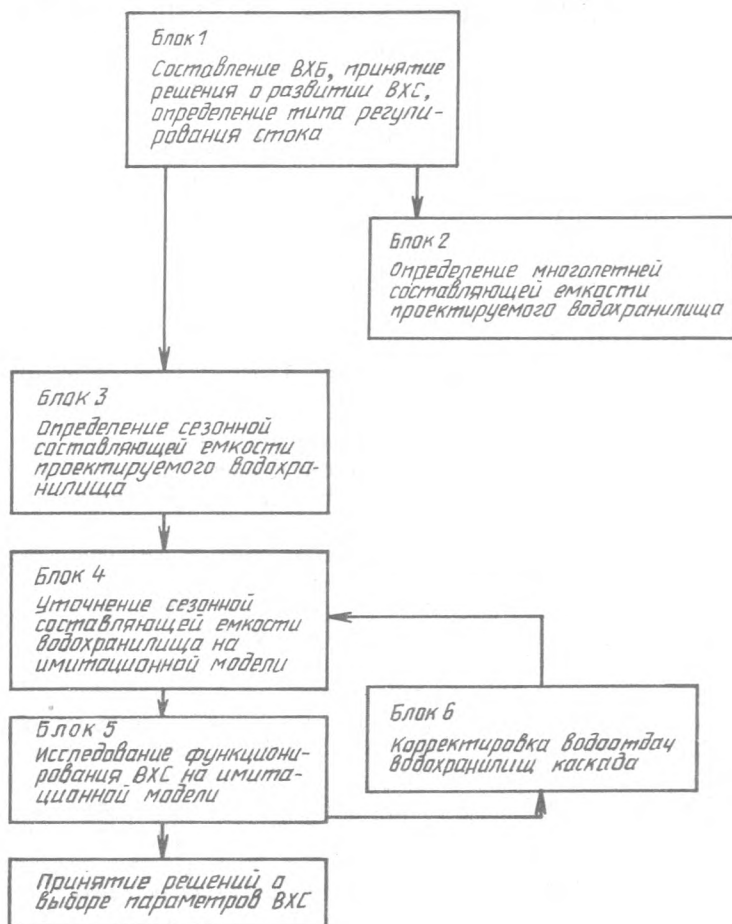


Рис. 63. Блок-схема расчетов по обоснованию развития ВХС

рование ВХС, которую предполагается развивать при существующих правилах управления системой и перспективном водопотреблении больше существующего. Расчет уточняют на оптимизационной модели. На основании анализа результатов моделирования принимают решение о методах увязки ВХБ, в том числе при необходимости — о применении регулирования стока. Устанавливают тип регулирования стока сравнением годового стока заданной обеспеченности и объемов перспективного водопотребления.

Если принимают решение о необходимости многолетнего регулирования стока в каком-либо из створов, то далее гидрологическими и экономическими расчетами вычисляют многолетнюю, а затем и сезонную составляющие вместимости проектируемого водохранилища. Определяют также гарантированные отдачи из всех водохранилищ, включая существующие и проектируемые.

Инженерные расчеты уточняют на имитационной модели.

Для определения эффективности полученного решения функционирования системы при полученных параметрах имитируют на модели. Полученные результаты сравнивают с нормативными и при необходимости корректируют. Таким образом принимают окончательное решение о развитии ВХС.

## 20. ИНФОРМАЦИОННОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ЗАДАЧ УПРАВЛЕНИЯ ВХС

Успешное управление ВХС может быть обеспечено только на основе надежной информационной базы, состоящей из исходных данных, необходимых для построения математических моделей и их машинных реализаций.

Для каждой задачи управления необходимо знать: вид, состав и объем, периодичность подачи информации, источник информации, формы ее подачи, методы обработки и точность информации.

По виду информацию подразделяют на природную, хозяйственную, экономическую и о правилах управления.

*Природная информация:* гидрологическая, топографическая, геологическая и гидрогеологическая, метеорологическая.

Гидрологическая информация состоит из показателей, характеризующих сток (норма стока, коэффициенты изменчивости, асимметрии и т. п.), уровенный режим в отдельные сезоны года за характерные годы, соотношения между экстремальными и средними значениями уровня, термический режим (сведения об изменениях температур, зимний режим и т. п.), твердый сток (зависимость мутности воды во времени, характер изменения мутности во времени, по ширине, глубине и длине потока, гранулометрический состав), химические, физические, биологические показатели качества воды.

Топографическая информация необходима при выборе створа и параметров гидроузлов и проведении водохозяйственных



расчетов. Ее представляют в виде морфометрических характеристик участков водотока и водохранилищ. Морфометрические характеристики участков водотока включают зависимости площадей зеркала воды и объемов от отметки уровней воды.

Морфометрической характеристикой водохранилища являются аналогичные кривые. Топографическая характеристика нижнего бьефа водохранилища — это зависимость уровней воды от расхода, который характеризуется условиями подпора от нижележащего водохранилища, изменяющимися в течение года.

Геологическая и гидрогеологическая информация включает данные о грунтах вдоль водотока, фильтрационных свойствах грунтов в ложе водохранилища и основаниях проектируемых сооружений, уровни, запасы и режимы подземных вод.

К метеорологической информации относятся данные о потерях на испарение с поверхности водохранилищ для характерных по увлажненности лет, скоростях и направлении ветра и др.

*Хозяйственная информация* может быть представлена следующими факторами: социальными, производственными, неводными, влияющими на выпуск продукции.

К социальным факторам относят административное деление территории, трудовые ресурсы, трудовые затраты на производство основных видов продукции, планы производства основных видов продукции, прогноз роста населения, нормы рационального питания, экологические показатели (необходимые объемы санитарных выпусков, показатели качества воды, сточных вод и т. п.), рекреационную ценность водоемов и т. д.

К неводным факторам, влияющим на объем выпускаемой продукции, можно отнести виды планируемой продукции, ресурсы земли разной категории (богарные, орошаемые, пригодные к орошению сенокосы, пастбища и т. п.), требуемые севообороты, нормы внесения удобрений, урожайности культур при разной степени увлажнения, состав отраслей животноводства, их продуктивность, удельную потребность каждого вида в кормах, эксплуатационные характеристики основного гидросилового оборудования, планируемую систему водоснабжения промышленных предприятий, энергоемкость основных видов продукции и т. д.

*Экономическая информация* — затраты на подачу воды из разных источников водопотребления на производство единицы продукции на основных и альтернативных вариантах; фондоемкость отдельных производств; стоимость 1 га затопляемых земель, переноса строений, дорог, линий связи и электропередач и других сооружений из зоны затопления.

*Информация о правилах управления* составляет особую группу. Это диспетчерские графики водохранилищ, мнения экспертов о весовых коэффициентах, таблицы приоритетов и т. д.

Вид информации не исчерпывается вышеперечисленными пока-

зателями, они зависят от вида решаемых при управлении задач, однако это наиболее часто встречающаяся информация.

Состав, объем и периодичность информации также определяются сложностью решаемых задач. Информация, как и задачи управления, носит иерархический характер, т. е. информация, полученная на более высоких ступенях иерархии, является наряду с приведенной выше исходной для более низкой ступени. В свою очередь, информация, полученная на более низких уровнях иерархии, позволяет уточнить информацию для более высоких уровней управления. Следовательно, потоки информации должны быть взаимосогласованными, и их обработка носить итеративный характер. Наиболее детальной должна быть информация, необходимая для анализа использования водных ресурсов и оперативного управления ВХС.

Не всякая информация требует предварительной обработки. К такой информации относятся, например, нормы потребления воды, внесения удобрений, урожайности культур и т. п.

Информация о природных условиях, статистика наблюдений за потреблением воды и многие другие виды информации используются при управлении в обработанном состоянии. Виды обработки многообразны, например использование математических методов для моделирования гидрологических рядов, проведение оптимизационных расчетов для получения производственных функций и т. п.

При обработке исходных данных необходимо сделать эквивалентный анализ информации, поступающей от разных ступеней управления. Информация как бы проходит своеобразный фильтр. В зависимости от того, от какого уровня (нижнего или верхнего) она поступает, происходит ее укрупнение (агрегатирование) или детализация (деагрегатирование). Агрегатирование информации можно проводить, объединяя информацию от объектов одного вида, либо выполняющих одинаковую функцию. Сложнее деагрегатирование информации, требующее специальных процедур.

Источником информации могут служить материалы непосредственных наблюдений, проектные проработки, статистическая отчетность, данные экспертного прогнозирования, результаты математического моделирования. Непосредственными наблюдениями получают данные о расходе воды, твердом стоке, уровнях водохранилищ, о показателях потребления воды и т. п. Многие материалы, не требующие обработки, можно найти в справочниках и нормативных документах. Анализ проектных материалов позволяет получить технико-экономические характеристики. При этом могут быть использованы методы теории обработки экспериментальных данных. Например, И. В. Бусалаевым на основе обработки стоимостных показателей по ряду типовых гидроузлов были получены зависимости стоимости вместимости водохранилища от его полного объема, по которым в первом приближении оценивают затраты на строительство гидроузлов для того, чтобы отбраковать варианты, требующие недопустимые с точки зрения ЛПР затраты на свое строительство.

Как уже указывалось выше, сложность управления ВХС в некоторой степени связана с тем, что долгосрочное планирование развития ВХС основано на использовании прогнозных показателей. Для прогнозирования развития уровня производства, демографических показателей, уровня потребления, с которыми связано развитие водного хозяйства, используют методы экстраполяции, аналогий, теории вероятностей и математической статистики, математического моделирования, экспертных оценок. Каждый из этих методов не лишен недостатков, увеличивающих неопределенность информации. При использовании метода экстраполяции большое значение имеют точность используемой информации о значениях прогнозируемых показателей в период, предшествующий прогнозируемому, а также выбор вида кривой, выражающей тенденции развития общества. Основой для успешного применения метода аналогий является достоверность данных, взятых для аналогии. При математическом моделировании используют данные экстраполяции, а также вероятностных расчетов по выявлению относительной частоты появления событий. Успешность, т. е. точность экспертного метода, который довольно часто используют для прогнозирования, зависит от подбора экспертов и методов обработки экспертных данных.

Источником информации служат также результаты решения задач предыдущего этапа управления.

Большое значение имеет форма представления данных. Объем информации, необходимой для решения задач управления ВХС, как видно из перечисленных выше видов информации, очень велик. Получение и обработка ее занимает большую часть времени при решении задач управления. Выбор формы, удобной для пользования, позволяет уменьшить это время. Она зависит от типа задачи, этапа планирования, методов обработки, типа ЭВМ. Форма представления информации может быть текстовой, табличной, графической, цифровой. Например, информация о необходимом ирригационном водопотреблении может быть представлена в виде двумерных массивов, размерность которых определяется числом характерных по водности лет и числом расчетных интервалов внутри одного года. В отличие от ирригационного водопотребления промышленное водоснабжение не зависит от водности года, поэтому эту информацию представляют в виде одномерного массива данных, число которых зависит от количества расчетных интервалов внутри года.

Необходимо обеспечить быстрый поиск информации и ее передачу к месту использования. Для этого организуют информационно-поисковую систему с иерархической организацией файлов данных, в которых процессы поиска информации направляются специальными программами.

При решении задач управления нужно обязательно оценить точность информации, так как от этого зависит точность решения задачи. Если информация имеет небольшую точность, то не имеет смысла

добиваться большой точности решения. Наиболее точной и адекватной действительности информация должна быть на низших уровнях иерархии управления.

Таким образом, информационное обеспечение задач управления ВХС очень сложно. Особенно большие трудности вызывают: выявление состава и объема информации, необходимой для решения задачи управления в каждом конкретном случае, методы обработки информации, адекватность информации, оценка влияния ее неопределенности и точности на точность принимаемого решения, методы проведения эквивалентного анализа и дезагрегатирования информации.

### *Контрольные вопросы и задания*

1. Что такое структура ВХС? Чем она отличается от функций?
2. Почему структуру ВХС формируют после увязки ВХБ? Каким образом можно было составлять и увязывать ВХБ, не сформировав структуру ВХС? В чем здесь дело?
3. Как бы вы назвали способ распределения водных ресурсов, при котором отрасли народного хозяйства совместно используют одну и ту же ВХС, соответственно распределяя между собой затраты на ее организацию?
4. Для чего нужен коэффициент экономической эффективности?
5. Что будет, если комплексные затраты между участниками распределены неправильно?
6. Чтобы определить срок замораживания капитальных вложений в строительство, нужно, в частности, знать время заполнения водохранилища до проектных отметок. Как его оценить?
7. Коэффициент сравнительной экономической эффективности: для чего он нужен и когда его применяют?
8. Почему недостаточно просто принять какое-нибудь правильное решение? Зачем нужна его оптимизация?
9. Какой вариант при отсутствии альтернативных считают оптимальным?
10. В какой последовательности, исходя из задачи максимизации валового сбора продукции, целесообразно ограничивать водопотребление растений: сокращением поливных площадей; увеличением КПД орошения; снижением оросительной нормы; снижением оросительной нормы и расширением поливных площадей?
11. Какой вариант структуры ВХС с точки зрения его оптимизации предпочтительнее: водопотребители расположены в верхнем бьефе; водопотребители в нижнем бьефе?

## Глава 6

### КОМПЛЕКСНЫЕ ГИДРОУЗЛЫ

#### 21. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ

После того как намечен состав участников водохозяйственного комплекса, выполнена предварительная оценка водохозяйственного баланса, т. е. когда выработаны основные принципы создания водохозяйственного комплекса, можно приступать к определению основных его параметров и проектированию гидротехнических сооружений. Комплекс гидротехнических сооружений, объединенных по распо-

ложению и целям их работы, создаваемый для участников водохозяйственного комплекса, называют *комплексным гидроузлом*. Это важнейшая составная часть водохозяйственной системы, которая представляет собой взаимосвязанные водные объекты и гидротехнические сооружения.

Все сооружения комплексных гидроузлов делят на отраслевые, используемые в интересах отдельных участников, и комплексные, используемые в интересах всех участников водохозяйственного комплекса.

В зависимости от состава участников на комплексных гидроузлах выделяют следующие отраслевые сооружения.

*Гидроэнергетические сооружения*, предназначенные для выработки и распределения электроэнергии: водоприемники и турбинные водоводы, здание гидроэлектростанции с энергетическим оборудованием, водоотводящие сооружения, вспомогательное оборудование, открытые распределительные устройства и др.

*Водозаборные сооружения*, которые осуществляют забор воды для нужд орошения, промышленного и коммунально-бытового водоснабжения: водоприемники, насосные станции, отстойники, очистные сооружения.

*Судоходные и лесосплавные сооружения*, предназначенные для пропуска и обслуживания судов, плотов, бревен через комплексный гидроузел: шлюзы, судоподъемники, причалы, плотоходы, бревнопуски и др.

*Рыбохозяйственные сооружения*, предназначенные для пропуска рыб проходных пород к местам нереста и обратно, защиты от попадания рыб в водозаборы и искусственного их разведения: рыбоходы, рыбопропускные шлюзы, рыбоподъемники, рыбозащитные сооружения, сооружения для искусственного рыборазведения.

*Сооружения для борьбы с вредным воздействием вод*, предназначенные для защиты населенных пунктов от наводнения, селевых потоков, берегов от разрушений, плодородных земель от смыва почвы и эрозии: защитные дамбы, водохранилища (или их часть) для сбора паводковых вод, использование которых особенно эффективно в сочетании с агро- и лесотехническими мероприятиями.

*Рекреационные сооружения*, предназначенные для организации всестороннего отдыха и лечения на воде: прежде всего оборудованные и защищенные от волнового воздействия пляжи, причальные сооружения и др.

Включение в состав водохозяйственного комплекса в качестве участника гидроэнергетики предполагает концентрацию перепада уровней воды (напора) в определенных створах.

В плотинных гидроузлах к комплексным сооружениям относят прежде всего плотину и водохранилище, а также и некоторые отраслевые сооружения (частично или полностью), если значение их в обеспечении нормального функционирования всего ВХК велико,

например причал на берегу водохранилища, который является основной транспортной узла, обслуживающего всех участников водохозяйственного комплекса.

В деривационных гидроузлах напор создают отводом воды из естественного русла с помощью деривации. Здесь к комплексным сооружениям можно отнести, например, деривационный канал или бассейн суточного регулирования стока, если их используют для водоснабжения, орошения, судоходства, водного туризма и т. п.

Комплексными сооружениями кроме перечисленных выше можно считать и некоторые вспомогательные сооружения, обеспечивающие нормальную эксплуатацию гидроузла, например жилые, административные, хозяйственные и культурно-бытовые постройки, дороги, водоснабжение, канализация, связь и т. п.

Как комплексные гидроузлы можно рассматривать и отдельные гидротехнические сооружения, такие, например, как крупный канал, используемый для судоходства, орошения, рыбного хозяйства, водоснабжения и т. п.; насосную станцию, подающую воду для всех участников водохозяйственного комплекса, и т. п.

По напору комплексные гидроузлы разделяют на низконапорные (до 10 м), средненапорные (10...50 м) и высоконапорные (более 50 м).

## 22. ОСНОВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ СООРУЖЕНИЙ КОМПЛЕКСНЫХ ГИДРОУЗЛОВ

К основным комплексным сооружениям относят плотину с водосбросными и другими специальными устройствами, водохранилище, крупный деривационный канал и некоторые другие.

Плотина – это водоподпорное сооружение, перегораживающее водоток и его долину для подъема уровня воды. Глухие плотины классифицируют:

по материалу изготовления тела: из грунта или каменной наброски, бетона, железобетона. Возможны комбинации различных типов материала;

конструктивным признакам и условиям статической работы: гравитационные, контрфорсные, арочные.

Тип плотины зависит от топографических, геологических, гидрогеологических и других условий, а также от масштаба водохозяйственного комплекса.

К основным параметрам плотины могут быть отнесены высота плотины, пропускная способность водосбросных сооружений, длина плотины по гребню и др.

Более подробно плотины изучаются в курсе гидротехнических сооружений.

Характеристики некоторых крупнейших водохранилищ мира приведены в таблице 14. Все эти водохранилища комплексные и используются в различных отраслях хозяйства стран, на территории которых они расположены.

14. Крупнейшие водохранилища мира (по А. Б. Авакяну)

| Название водохранилища         | Страна                  | Река, озеро                 | Объем водохранилища, км <sup>3</sup> |          | Площадь зеркала, км <sup>2</sup> | Виды использования |
|--------------------------------|-------------------------|-----------------------------|--------------------------------------|----------|----------------------------------|--------------------|
|                                |                         |                             | полный                               | полезный |                                  |                    |
| Виктория (Оуэн-Фолс)           | Уганда, Танзания, Кения | Виктория, Нил, оз. Виктория | 204,8                                | 204,8    | 76000                            | ЭРИ                |
| Братское                       | Россия                  | Ангара                      | 169,3                                | 48,2     | 5470                             | ЭСЛВРО             |
| Кариба                         | Замбия, Зимбабве        | Замбези                     | 10,3                                 | 46       | 4450                             | ЭСИРН              |
| Насер (Салд Эль-Аали)          | Судан                   | Нил                         | 157                                  | 74       | 5120                             | ИЭНСР              |
| Вольта (Акосомбо)              | Гана                    | Вольта                      | 148                                  | 90       | 8480                             | ЭСИРН              |
| Даниел-Джонсон (Маникуа Ган-5) | Канада                  | Р. и оз. Маникуаган         | 141,8                                | 85,9     | 1950                             | ЭСН                |
| Гури (Эль-Мантеко)             | Венесуэла               | Карони                      | 135                                  | 55       | 4250                             | Э                  |
| Красноярское                   | Россия                  | Енисей                      | 73,3                                 | 30,4     | 2000                             | ЭСЛВНО             |
| Вади-Тартар                    | Ирак                    | Наливное из оз. р. Тигр     | 72,8                                 | 43,5     | 2000                             | НИ                 |
| Гордон м. Шрам                 | Канада                  | Пис                         | 70,1                                 | 37       | 1680                             | ЭНС                |
| Зейское                        | Россия                  | Зeya                        | 68,4                                 | 32,1     | 2420                             | НЭСЛР              |
| Кабора-Басса                   | Мозамбик                | Замбези                     | 63,0                                 | 51,8     | 2700                             | ЭСР                |
| Ла-Гранд 2                     | Канада                  | Ла-Гранд                    | 60,8                                 | 28,8     | 4085                             | Э                  |
| Усть-Илимское                  | Россия                  | Ангара                      | 59,4                                 | 2,8      | 1870                             | ЭСЛРВ              |
| Богучанское                    | "                       | Ангара                      | 58,2                                 | 2,3      | 2325                             | ЭСЛ                |
| Куйбышевское                   | "                       | Волга                       | 58                                   | 34,6     | 5900                             | ЭСВИРО             |
| Ла-Гранд 3                     | Канада                  | Ла-Гранд                    | 56                                   | 16,5     | 2460                             | Э                  |
| Бухтарминское                  | Россия                  | Иртыш                       | 49,6                                 | 30,8     | 5490                             | ЭСНО               |
| Байкальское (Иркутское)        | "                       | Ангара, оз. Байкал          | 47,6                                 | 46,6     | 32965                            | ЭСЛВРО             |
| Серрос-Колорадос               | Аргентина               | Неукен                      | 43,4                                 | 5,6      | 607                              | ЭИ                 |
| Тукуруи                        | Бразилия                | Токантинс                   | 43                                   | 23       | 2160                             | Э                  |

Примечание. Э — энергетика; Р — рыбное хозяйство; И — ирригация; С — судостроение; В — водоснабжение; О — рекреация; Н — борьба с наводнениями; Л — лесосплав.

В бывшем СССР эксплуатировалось свыше 4 тыс. водохранилищ объемом более 1 млн м<sup>3</sup> каждое. Расположены водохранилища по территории довольно неравномерно. Около 45 % полного объема и более 35 % площади водного зеркала приходится на водохранилища Восточной Сибири и Дальнего Востока. Значительные объемы воды находятся в водохранилищах на реках Средней Азии, Волжско-Камского, Днепровского каскадов, ряде других рек. На реках остальных административно-экономических районов объемы водохранилищ значительно меньше. В наиболее заселенных районах страны расположены, как правило, малые и средние водохранилища объемом до 1 км<sup>3</sup>.

По средним объемам и площади водохранилища ряда регионов бывшего СССР значительно превышают водохранилища многих крупных стран мира (табл. 15). Среди 20 самых крупных водохранилищ мира 8 расположены на территории бывшего СССР (см. табл. 14). Однако в последнее время отмечают отрицательные последствия создания крупных водохранилищ, особенно на равнинных территориях. Поэтому в будущем более перспективно создание водохранилищ меньшего объема, особенно в условиях равнинных территорий.

Рассмотрим классификацию водохранилищ, используемых в водохозяйственном строительстве:

по способу образования: речные долинные, наливные (с помощью подводящего канала), морские (чаще всего опресненные), озера-водохранилища, на временных водотоках;

по географическому положению: равнинные со средней глубиной 5...9 м, предгорные — до 30...35, горные — до 100...200 м;

#### 15. Водоохранилища вместимостью более 100 млн м<sup>3</sup> (по А. Б. Авакяну)

| Часть света, материк  | Число водохранилищ | Полный объем водохранилищ, км <sup>3</sup> | Средний объем рассматриваемых водохранилищ, км <sup>3</sup> |
|-----------------------|--------------------|--|---|
| Европа                | 512                | 586,2                                      | 1,1   |
| В том числе:          |                    |  |   |
| бывший СССР           | 132                | 407,7                                      | 3,1   |
| зарубежная Европа     | 380                | 178,5                                      | 0,5   |
| Азия                  | 647                | 1536,3                                     | 2,4   |
| В том числе:          |                    |  |   |
| бывший СССР           | 105                | 765,6                                      | 7,3   |
| зарубежная Азия       | 542                | 770,7                                      | 1,4   |
| Китай                 | 147                | 237,3                                      | 1,6   |
| Индия                 | 202                | 226,9                                      | 1,2   |
| Иран                  | 7                  | 131,6                                      | 18,8  |
| Африка                | 115                | 884,7                                      | 7,7   |
| В том числе:          |                    |  |   |
| Гана                  | 1                  | 148,7                                      | 148,7   |
| Египет                | 2                  | 149  | —   |
| Замбия и Зимбабве     | 4                  | 161,6                                      | —   |
| Северная Америка      | 887                | 1677,3                                     | 1,9   |
| В том числе:          |                    |  |   |
| США                   | 689                | 778,9                                      | 1,3   |
| Канада                | 140                | 770,5                                      | 5,5   |
| Мексика               | 140                | 127,9                                      | 2,2   |
| Южная Америка         | 211                | 688,7                                      | 3,3   |
| В том числе:          |                    |  |   |
| Бразилия              | 92                 | 352,6                                      | 3,5   |
| Аргентина             | 32                 | 112,8                                      | 3,5   |
| Венесуэла             | 16                 | 143,9                                      | 9   |
| Австралия и Океания   | 70                 | 75,7                                       | 1,1   |
| В том числе Австралия | 60                 | 70   | 1,1   |
| Всего:                | 2442               | 5448,9                                     | 2,2   |



по характеру регулирования стока: многолетние, годовые (полные или неполные), месячные, недельные и суточные;

по условиям использования: энергетические, ирригационные и т. п., комплексные.

Водохранилища можно квалифицировать также по объему, площади, глубине, глубине сработки, водообмену, гидрохимическим и гидробиологическим показателям, качеству воды (вода очень чистая, чистая, незначительно загрязненная, сильно загрязненная, очень загрязненная).

Основные параметры и характеристики водохранилища приведены на рисунке 64.

Для верхнего бьефа характеристической водохранилища являются графики связи между отметками в верхнем бьефе и объемом, а также площадью зеркала водохранилища  $z_{ВБ} = f(V)$ ,  $z_{ВБ} = f(F)$ , показанные на рисунке 65, а. Данные характеристики могут быть получены в результате обработки топографических планов местности.

Для нижнего бьефа гидроузла в качестве характеристики используют график связи между отметками и расходами воды  $z_{НБ} = f(Q_{НБ})$ , показанный на рисунке 65, б. Этот график может быть получен в результате гидрологических изысканий.

Более подробно основные параметры гидротехнических сооружений участников водохозяйственных комплексов рассматривают в специальных курсах (орошение, водоснабжение, гидротехнические сооружения и пр.). Здесь же важно отметить, что размеры этих сооружений сильно зависят от объемов воды, используемой в интересах участников водохозяйственного комплекса. Так, для орошения и водоснабжения важны объемы водозаборов; судоходства, лесосплава, рыбного хозяйства — объемы попуска воды в нижний бьеф; для гидроэнергетики, рыбного хозяйства, рекреации и др. кроме попусков воды важное значение имеют уровни воды в верхнем и нижнем бьефах водохранилища.

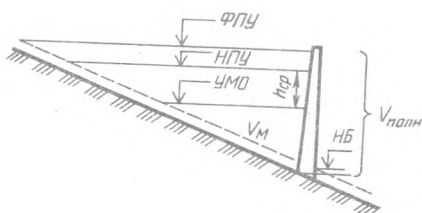


Рис. 64. Основные параметры и характеристики водохранилища:

НПУ — нормальный подпорный уровень — максимальный уровень воды в водохранилище в условиях нормальной эксплуатации; ФПУ — форсированный подпорный уровень — уровень, который допускается в течение непродолжительного периода времени при пропуске максимальных расходов половодья и паводков; УМО — уровень мертвого объема — наинизший уровень сработки водохранилища в период его нормальной эксплуатации;  $h_{ср}$  — средняя глубина сработки водохранилища; НБ — отметка воды в нижнем бьефе гидроузла;  $V_{полн}$  — полный объем водохранилища (резервный объем учитывается, если водохранилище используется и для борьбы с наводнениями),  $V_{полн} = V_{м} + V_{п} (+ V_{р})$ , где  $V_{м}$  — мертвый объем;  $V_{п}$  — полезный объем;  $V_{р}$  — расчетный объем

симальных расходов половодья и паводков; УМО — уровень мертвого объема — наинизший уровень сработки водохранилища в период его нормальной эксплуатации;  $h_{ср}$  — средняя глубина сработки водохранилища; НБ — отметка воды в нижнем бьефе гидроузла;  $V_{полн}$  — полный объем водохранилища (резервный объем учитывается, если водохранилище используется и для борьбы с наводнениями),  $V_{полн} = V_{м} + V_{п} (+ V_{р})$ , где  $V_{м}$  — мертвый объем;  $V_{п}$  — полезный объем;  $V_{р}$  — расчетный объем

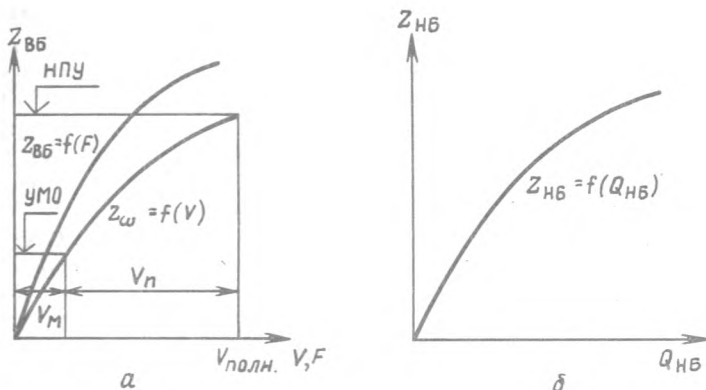


Рис. 65. Кривые зависимостей площадей зеркала, объемов (а) и расходов (б) от уровней воды в водохранилище:

$z_{ВБ}$  — отметки воды в водохранилище;  $V, F$  — объем и площадь зеркала водохранилища;  $z_{НБ}$  — уровень в нижнем бьефе гидроузла;  $Q_{НБ}$  — расход воды в створе ниже гидроузла

Таким образом, для назначения основных параметров комплексного гидроузла необходимо прежде всего определить размеры водохранилища, а также объемы водопотребления всеми участниками водохозяйственного комплекса.

## 23. УПРАВЛЕНИЕ РЕЖИМОМ РАБОТЫ КОМПЛЕКСНЫХ ГИДРОУЗЛОВ

### 23.1. Основные показатели режима работы комплексного гидроузла

Расчет параметров и режима работы водохранилищ дается в теории регулирования стока, которая позволяет установить соотношение между основными характеристиками гидроузла: емкостью водохранилища, количеством воды, предоставляемой потребителям (отдачей водохранилища), и обеспеченностью отдачи.

*Расчетная обеспеченность отдачи* характеризует надежность водообеспечения потребителей. Она нормализуется в зависимости от вида потребителей и отражает их реакцию на перерывы в нормальном водообеспечении. Чаще всего расчетная водообеспеченность характеризуется в процентах как вероятность числа бесперебойных лет, в течение которых потребителей удовлетворяют водой полностью. Водопотребители разделены на три категории:

потребители, требующие практически бесперебойной водоподачи ( $P = 96...99$  % по числу бесперебойных лет);

потребители, допускающие более или менее частые отклонения от нормального водоснабжения ( $P = 85...90$  %);

наиболее водоемкие потребители, имеющие резервы и стремя-

щиеся к наиболее полному использованию избытков стока ( $P = 78...80\%$ ).

В первую категорию входят коммунальное водоснабжение, промышленность, крупные гидроэлектростанции, во вторую – водный транспорт, остальные ГЭС, в третью – сельское и рыбное хозяйство.

Расчетная обеспеченность отдачи является основой для планирования выпуска соответствующей продукции и выбора параметров ВХС и требует технико-экономического обоснования.

Расчетная обеспеченность отдельных компонентов ВХС характеризует работу комплексного гидроузла в режиме нормальной водоподачи.

Нормальный, или *гарантированный, режим водоподачи* – одна из основных характеристик гидроузлов. В этом режиме участники водохозяйственного комплекса получают то количество воды, на которое рассчитаны их производственные мощности и план выпуска продукции (выработка электроэнергии, количество перевезенного водным транспортом груза, урожай сельскохозяйственных культур и т. д.). Гидроузел при этом обеспечивает *гарантированную отдачу*, т. е. такую, которая с заданной обеспеченностью удовлетворяет требования потребителей в воде за многолетний период. Выражают ее в объемах воды, выделяемых для нужд каждого из участников. Режим распределения гарантированной отдачи во времени определяет режимы сработки и наполнения водохранилища.

Обеспечение гарантированной отдачи – лишь одна из функций водохранилища. Кроме режима нормальной водоподачи различают режимы работы в условиях дефицита водных ресурсов и их избытков.

Режим работы в условиях дефицита воды приводит к определенному виду ущербам в народном хозяйстве, выражающимся в зависимости от глубины дефицита либо в увеличении издержек производства, либо в невыполнении плана выпуска продукции водопотребителем. В связи со всевозрастающим объемом водопотребления все чаще возникает режим работы в условиях дефицита. Поэтому в практику водохозяйственных расчетов кроме показателя расчетной обеспеченности вводят *показатель обеспеченности урезанного водопотребления*. Как правило, этот показатель назначают достаточно высоким для всех водопотребителей.

*Использование избытков воды* также сопряжено с трудностями. Для их использования необходимо, чтобы избытки воды требовались именно в тот период времени, когда они появляются. Однако появление избытков носит случайный характер. Для большинства водопотребителей – участников водохозяйственного комплекса – избытки воды сверх гарантированных можно использовать лишь в определенных пределах. Например, если их направить на орошение, то необходимо наличие подготовленных земель, а на гидроэлектростанции необходимо наличие специальной емкости и включение в график нагрузки энергосистемы.

Одна из важнейших функций водохранилища – обеспечение безопасности сооружений системы при появлении избытков воды сверх гарантированных. Безопасность гидроузла и его бьефов обеспечивается в соответствии с классом капитальности сооружений.

### 23.2. Диспетчерское управление работой водохранилищ

Основным показателем, определяющим эффективность работы водохранилища, является степень использования стока при обеспечении безопасности основных сооружений гидроузла и объектов народного хозяйства, расположенных в верхнем и нижнем бьефах.

Наиболее эффективен режим работы водохранилища, предусматривающий заблаговременное опорожнение его перед многоводным периодом и экономию потребления воды перед ожидаемым маловодьем. Однако точно реализовать этот режим невозможно из-за несовершенства гидрологического прогноза и незначительной длительности цикла регулирования стока.

Поэтому разрабатывают специальные правила управления работой водохранилищ для того, чтобы в условиях неопределенной информации о предстоящем стоке работники службы эксплуатации гидроузла могли в каждый конкретный момент времени устанавливать величину ппуска из водохранилища. Его можно назначать равным гарантированному, меньше или больше. Если величина ппуска будет принята ошибочно, то возможно либо неиспользование стока, либо преждевременный расход запасов воды в водохранилище, что в дальнейшем нарушит нормальную водоподачу.

По этой причине одновременно с водохозяйственными расчетами гарантированной отдачи и выбором параметров гидроузла разрабатывают правила его будущей эксплуатации. Методику построения этих правил рассматривают в теории регулирования стока, и заключается она в использовании при разработке правил эксплуатации результатов анализа работы гидроузла в различных условиях водности, наблюдавшихся в прошлом.

Порядок эксплуатации водохранилищ приводят в виде диспетчерских правил, представляющих собой сочетание правил обеспечения гарантированной отдачи, своевременного опорожнения емкости водохранилища для аккумуляирования паводка и использования избыточных стоков.

Пользуясь диспетчерскими правилами, можно определить отдачу из водохранилища в конкретных гидрологических условиях.

Наиболее распространенная форма диспетчерских правил – это диспетчерский график – зависимость, построенная в координатах время – объем (уровень) воды в водохранилище, представляющая собой серию кривых, которые делят емкость водохранилища на отдельные зоны, соответствующие вышеперечисленным функциям водохранилища: гарантированной отдачи, урезанной отдачи, макси-

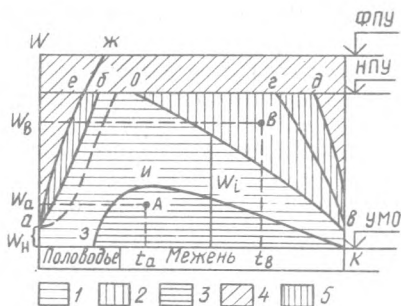


Рис. 66. Диспетчерский график работы водохранилища:  
 1 — зона гарантированной отдачи; 2, 3 — зоны повышенной и пониженной отдачи; 4 — зона холостых сбросов; 5 — зона полной производительности водохозяйственных установок; *абв* — ветвь наполнения противоперебойной линии; *аеж* — ветвь сработки противоперебойной линии; *зг* — ветвь наполнения противоаварийной линии; *дв* — ветвь сработки противоаварийной линии; *зик* — линия ограничивающая зону пониженной отдачи

мального использования стока, безопасности сооружений (рис. 66). Пользуясь диспетчерским графиком, можно получить конкретную рекомендацию по назначению отдачи из водохранилища, имея только один управляющий параметр — уровень. Например, если в период времени  $\tau_a$  объем воды в водохранилище равен  $W_a$ , то, поскольку точка *A* с координатами  $V_a, \tau_a$  находится в зоне урезанной отдачи, отдача  $Q$  в момент времени  $\tau_a$  меньше гарантированной на заранее определенный процент. А в момент времени  $\tau_b$  для точки *B* с координатами  $\tau_b, V_b$  отдача выше гарантированной  $Q_r$ , т. е.

$$Q_a < Q_r, \quad Q_b > Q_r. \quad (183)$$

Кривую, ограничивающую зону гарантированной отдачи сверху, называют противоперебойной (линия *абв* на рис. 66); кривую, ограничивающую зону гарантированной отдачи снизу, а зону пониженной отдачи сверху, — линией урезанной отдачи, или нижней противоперебойной линией (линия *зик* на рис. 66). Зона пониженной отдачи снизу ограничена уровнем мертвого объема — противоперебойной линией, а сверху — противосбросной, служащей нижней границей зоны, в которой отдача соответствует полной производительности водохозяйственных установок (линия *зг* на рис. 66). Эта зона сверху ограничена противоаварийной линией (линии *аеж* и *дв* на рис. 66). Последняя является нижней границей зоны холостых сбросов, которая сверху ограничена ФПУ.

Все перечисленные линии — элементы диспетчерского графика. Каждая из них имеет две ветви — наполнения и сработки, соответствующие различным фазам (половодья или межени).

Если гарантированную отдачу обозначить через  $Q_z$ , а полную производительность всех водохозяйственных установок —  $Q_{ппу}$ , холостые сбросы —  $Q_{хс}$ , то отдача в зонах будет следующей:

- в зоне гарантированной отдачи  $Q_1 = Q_z$ ;
- зоне пониженной отдачи  $Q_2 < Q_z$ ;
- зоне повышенной водоотдачи  $Q_{ппу} > Q_3 > Q_z$ ;
- зоне полной производительности установок  $Q_4 = Q_{ппу}$ ;
- зоне холостых сбросов  $Q_5 = Q_{ппу} + Q_{хс}$ .

Число зон, их конфигурация зависят от следующих факторов: вида регулирования стока водохранилищем, характера внутригодового распределения стока, состава участников водохозяйственного комплекса, топографических характеристик водохранилища (если в составе участников имеется гидроэнергетика).

Если отдача из водохранилища происходит в соответствии с принятой обеспеченностью, различной для разных участников водохозяйственного комплекса, то зона гарантированной отдачи делится на несколько подзон.

### 23.3. Построение элементов диспетчерского графика

При построении диспетчерских графиков задают следующие исходные данные: размер, обеспеченность и распределение в течение года гарантированной отдачи всем участникам ВХК; производительность водохозяйственных установок; гидрологическую характеристику водотока в створе водохранилища за весь период наблюдений (с учетом антропогенных изменений стока); масштабы регулирования стока; параметры водохранилища.

Прежде всего определяют фазы, в пределах которых происходит сработка или наполнение сезонной емкости водохранилища. Сработка начинается на спаде половодья в моменты, когда расход притока будет равен регулируемому. Чем выше степень регулирования стока, тем длиннее эти фазы. При многолетнем и полном годичном регулировании стока суммарная длительность фаз наполнения и сработки равна году: фазой сработки охватывается вся межень, а в остальную часть года заполняется сезонная емкость. При неполном годичном регулировании стока сокращается длительность периодов сработки и наполнения, их суммарная продолжительность меньше года.

Поскольку для расчета различных элементов диспетчерских графиков принимают сток различной обеспеченности, при построении каждой линии деление на фазы проводят отдельно.

Зная календарные границы фаз, можно провести статистическую обработку стоковых данных по фазам за имеющийся период наблюдений и рассчитать соответствующие параметры: кривые обеспеченности меженного и половодного стоков, объемы стоков за фазы сработки и наполнения  $V_M^P$  и  $V_H^P$  и за водохозяйственный год  $V_r^P$ .

Расчет и построение элементов диспетчерского графика начинают с ветви сработки противоположной линии (ППЛ), уточняя размер сезонной вместимости водохранилища, определенный предварительно другими расчетами.

**Расчет координат ветви сработки противоположной линии.**

1. Определяют запасы воды, которые должны находиться в водохранилище на начало каждого месяца в маловодный период:

$$w_{дмi} = \sum_{i=1}^n (w_{расxi} - w_{приxi}), \quad (184)$$

где  $w_{расхi}$ ,  $w_{прихi}$  — объемы расходной и приходной частей водохозяйственного баланса в  $i$ -м месяце;  $n$  — число месяцев в маловодном периоде.

Расчет ведут "ходом назад", т. е. от последнего месяца маловодного периода к первому. Это требуется для того, чтобы гарантировать наличие необходимого объема воды во все месяцы маловодного периода. На начало последнего месяца маловодного периода объем воды в водохранилище должен равняться разности приходной и расходной частей ВХБ только в этом месяце. В предыдущем месяце в водохранилище должен находиться объем воды, обеспечивающий покрытие дефицита воды за два месяца (предпоследний и последний) и т. д. К началу маловодного периода запас воды в водохранилище должен покрывать дефицит (превышение потребления над поступлением воды) за весь маловодный период.

2. Координаты ветви сработки ППЛ вычисляют по зависимости

$$w_i^{ср} = w_{дми} + W_{п}, \quad (185)$$

где  $W_{п}$  — запас воды, который должен остаться в водохранилище на начало многоводного периода,

$$W_{п} = W_{прих} - W_{расх}, \quad (186)$$

где  $W_{прих}$  и  $W_{расх}$  — объемы приходной и расходной частей ВХБ в расчетном году.

Расчет осуществляют для нескольких лет, сток которых за маловодный период близок к стоку межени (маловодного периода), определенному по кривой обеспеченности стока фазы маловодья  $V_M^P$  для маловодного периода принятой обеспеченности.

Вследствие разного времени прохождения волны половодья (многоводного периода) ветви сработки для каждого конкретного года начинаются в различных точках на шкале времени. За ветвь сработки принимают верхнюю огибающую всех построенных линий.

Аналогично строят ветвь сработки линии урезанной водоотдачи (нижней противоперебойной линии). Однако при расчете приходной части ВХБ принимают сток большей обеспеченности, а при расчете расходной части — потребление, уменьшенное на соответствующий процент. Очевидно, что при этом изменяются и объемы возвратных вод.

Урезанную водоподачу назначают потому, что при неизбежности перебора целесообразно заблаговременное постепенное сокращение отдачи без опорожнения водохранилища полностью, так как режим, при котором отдача сохраняется на уровне 60 или 80 % гарантированной, не столь болезнен, как режим, приводящий к полному отказу потребителю в воде, даже если время более жесткого ограничения короче, т. е. полный объем ограничения меньше.

Ветви сработки противосбросной и противоаварийной линии строят аналогично ветви сработки противоперебойной линии. Однако объемы приходной и расходной частей ВХБ будут различными. Приходную часть рассчитывают для стока меньшей обеспеченности и

большого объема возвратных вод, поскольку объем потребления принимают больший.

Расходную часть ВХБ при расчете противосбросной линии определяют для случая работы всех водохозяйственных установок с полной производительностью, складывающейся из следующих необходимых объемов: для удовлетворения нужд приоритетных водопотребителей (коммунально-бытового хозяйства, животноводства, рекреации и т. п.); для орошения полной оросительной нормой площадей, подготовленных к орошению; объемов воды, которые можно пропустить через все турбины гидроэлектростанции, включая резервные; для попуска в нижний бьеф на нужды водного транспорта и рыбного хозяйства согласно полным требованиям этих участников водохозяйственного комплекса.

При расчете противоаварийной линии к этим объемам добавляют объем воды, сбрасываемый через водосбросные сооружения, так называемый холостой объем.

Ветвь сработки противосбросной линии должна обеспечить к началу половодья опорожнение водохранилища до уровня, соответствующего положению противоперебойной линии на ту же дату. От этого момента времени расчет ведут "ходом назад" до момента времени, когда ордината ветви сработки противосбросной линии будет равна полному объему водохранилища. Для выполнения основной задачи – предотвратить сбросы – нижний конец противосбросной линии должен быть ориентирован на раннее начало половодья.

Ветви наполнения рассчитывают в таком порядке.

1. Определяют объем незаполненной емкости в водохранилище к началу каждого месяца в период многоводья:

$$w_{дпi} = \Sigma (w_{приxi} - w_{расxi}). \quad (187)$$

2. Вычисляют координаты ветви наполнения

$$w_i^{нап} = W_{вод} - w_{дпi}, \quad (188)$$

где  $W_{вод}$  – полный объем водохранилища.

Ветвь наполнения ППЛ (верхней и нижней) строят для стока маловодного года, например 75 и 95 %-ной обеспеченности, ветви наполнения противосбросной и противоаварийной линии – для стока многоводного года (малой обеспеченности).

При построении ветви наполнения ППЛ расчет ведут для лет с ранним и поздним началом многоводного периода. За начало построения принимают даты окончания наполнения водохранилища (начало сработки водохранилища). Расчет ведется "ходом назад", так как в начале последнего многоводного месяца должна быть обеспечена свободная емкость, равная  $w_{приxi} - w_{расxi}$ , где  $w_{приxi}$  и  $w_{расxi}$  – приходная и расходная части ВХБ рассматриваемого месяца. Далее рассматривают два месяца (последний и предпоследний). К началу пред-



последнего многоводного месяца свободная емкость должна вмещать объем

$$(w_{\text{прих}i} - w_{\text{расх}i}) + (w_{\text{прих}i-1} - w_{\text{расх}i-1}), \quad (189)$$

где  $w_{\text{прих}i-1}$  и  $w_{\text{расх}i-1}$  — приходная и расходная части ВХБ предпоследнего месяца.

Расчет продолжают до начала многоводного периода.

При расчете ветви наполнения противосбросной линии могут встретиться два случая:

в первом случае наибольшая ордината ветви наполнения противосбросной линии превышает соответствующую диспетчерскую емкость предполоводной сработки водохранилища, что свидетельствует о невозможности предотвращения холостых сбросов. Это свойственно водохранилищам с неполным годичным регулированием стока (при маленьком объеме водохранилища) либо при малой полной производительности водохозяйственных установок и сосредоточенных половодьях. Таким образом, если объем половодья (вместе с возвратными водами) для года принятой (малой) обеспеченности больше  $W_{\text{вод}} + w_{\text{ппу}}$ , то сбросы неизбежны и ветвь наполнения противосбросной линии пройдет ниже ветви сработки противоперебойной линии. При таком соотношении построение противосбросной линии можно ограничить построением лишь ветви сработки, так как в этот период очень важно в ожидании многоводья опорожнить водохранилище попуском соответствующего объема. Ветвь же наполнения будет одна (только IIIЛ, так как предпочтение отдается предотвращению перебоев);

во втором случае наибольшая ордината противосбросной линии не достигает величины диспетчерской емкости предполоводной сработки, что указывает на возможность полного предотвращения сбросов, своевременно перейдя на повышенную отдачу. Такое положение характерно при невысоких и растянутых половодьях, больших размерах водохранилища и высокой производительности водохозяйственных установок.

В связи с разным временем прохождения волны половодья для ветви наполнения противосбросной линии подобно ветви наполнения противоперебойной линии также применяют скользящую шкалу времени.

Зоны повышенной и пониженной водоотдачи можно разбить на подзоны.

При построении противосбросной линии расчеты ведут по стоку многоводной зимы.

Противоаварийная линия (линии  $ae$  и  $de$  на рис. 66) ограничивает снизу зону холостых сбросов. Расчет осуществляют навстречу ходу времени, начиная с момента, когда расход воды в реке, снижаясь на спаде половодья, достигает величины  $Q$ :

$$Q = Q_{\text{ппу}} + Q_{\text{х}} \quad (190)$$

где  $Q_{ппу}$  — полная производительность водохозяйственных установок;  $Q_x$  — расход холостых сбросов через все водосбросные отверстия.

Водохранилище при этом должно быть наполнено до максимального уровня.

При отдаче воды из водохранилища, равной  $Q$ , объемы воды в нем вычисляют аналогично расчетам при построении ветви наполнения противоперебойной линии. Противоаварийная линия должна касаться противоперебойной в самой нижней ее точке, соответствующей началу фазы половодья (точки  $a$  или  $b$  на рис. 66). В противном случае при некотором наполнении водохранилища в предполоводный период должен назначаться холостой сброс, несмотря на то что в этот же период необходимо для предотвращения перебоя ограничиться гарантированной отдачей. Если же противоаварийная линия расположится выше противоперебойной, не касаясь ее и не пересекаясь с ней, то емкость водохранилища недостаточно использована. В этом случае можно поднять отметку  $НПУ$ , увеличивая тем самым степень регулирования стока, либо уменьшать стоимость подпорных сооружений, снижая отметку форсированного уровня.

Условия построения элементов диспетчерского графика (по С. Н. Крицкому и М. Ф. Менкелю) сведены в таблицу 16.

Диспетчерские правила регламентируют отдачу водохранилища в зависимости от его наполнения в определенный момент времени независимо от срочного прогноза стока, который увеличивает эффект управления, сокращая холостые сбросы за счет повышения отдачи по сравнению с гарантированной, предвидя высокое половодье. Заблаговременно предвидя водность межлетнего периода, можно увеличить эффект использования излишков воды при стоке, превышающем расчетный, или смягчить глубину перебоя при стоке, меньшем расчетного.

Особенности диспетчерских правил управления режимами работы водохранилищ при работе группы водохранилищ в одной системе даны в специальной литературе. Решение задачи управления ВХС в этом случае сводится к получению зависимости отдачи  $\alpha_{ij}$  в  $i$ -м интервале времени из  $j$ -го водохранилища от совокупности показателей  $\{z_{ij}\}$ , характеризующих запасы воды в водохранилищах к моменту наступления времени  $i$ , совокупности показателей  $\{Q_{(i-1)j}\}$ ,  $\{Q_{(i-z)j}\}$  и т. д., характеризующих приток воды в водохранилища в моменты времени  $(i-1)$ ,  $(i-z)$  и т. д., совокупности показателей  $\{\Pi_{(i-1)j}\}$ , характеризующих потребление воды в течение предыдущего интервала времени:

$$\alpha_{ij} = f(\{z_{ij}\}; \{Q_{(i-1)j}\}; \{Q_{(i-z)j}\}; \dots; \{\Pi_{(i-1)j}\}). \quad (191)$$

Если условия работы гидроузла со временем изменяются, то и положение режимных зон не остается постоянным, отражая изменение обстановки в системе по мере ее развития. Поэтому необходимо построение и использование динамических диспетчерских правил.

16. Элементы диспетчерского графика

| Линия                                       | Ветвь        | Момент, определяющий построение линии "ходом назад" | Обеспечиваемое условие   | Расчетные элементы |   |         |
|---|--------------|---|--|--------------------|---|---------|
|   |              |   |  | сток               | отдача  |         |
| Противоперебойная                           | Сработки     | Конец межени  | Наполнение не ниже допущенного предполоводного опорожнения (т. е. объем воды в водохранилище не меньше $W_H$ ) | Низкий             | Гарантируемая   | Верхняя |
|   | То же        | То же   |  |                    |   |         |
| Противосбросная                             | Наполнения   | То же половодья                                     | Наполнение не ниже допущенного предполоводного опорожнения (т. е. объем воды на конец межени не выше $W_H$ )   | " "                | Полная производительность водохозяйственных установок | " "     |
|   | Сработки     | То же межени  |  |                    |   |         |
| То же                                       | Наполнения   | То же половодья                                     | Наполнение не выше допущенного   | " "                | То же   | " "     |
|   |              | То же межени  |  |                    |   |         |
| Противоаварийная                            | То же межени | То же межени  | Наполнение равно допущенному предполоводному опорожению  | " "                | " "   | " "     |
|   |              |   |  |                    |   |         |
| Ограничивающая сверху зону урезанной отдачи | То же межени | То же межени  | Наполнение на уровне мертвого объема   | Низкий             | Отдача сниженная                                      | Верхняя |
|   |              |   |  |                    |   |         |

Распределение воды между потребителями при построении диспетчерских графиков не рассматривают.

Изложенная выше методика является традиционной. Математическая формализация методов построения правил управления каскадами гидроузлов позволяет автоматизировать построение диспетчерских правил управления каскадом гидроузлов с использованием ЭВМ.

#### **23.4. Основные положения правил использования водных ресурсов водохранилища**

Основные положения правил использования водных ресурсов, которые разрабатывают для каждого гидроузла на стадии рабочего проектирования, базируются на диспетчерских правилах. Это обязательный руководящий документ независимо от ведомственной принадлежности организаций, эксплуатирующих водохранилища. Поэтому все технические документы, которые каким-либо образом регламентируют режим эксплуатации водохранилища, разрабатывают в соответствии с Основными положениями правил использования водных ресурсов рассматриваемого водохранилища. Переход на режим работы, не предусмотренный этими правилами, разрешается лишь при обстоятельствах, требующих принятия неотложных мер из-за угрозы безопасности населения и сохранности гидротехнических сооружений. За отклонения от режимов, регламентированных правилами, организация, эксплуатирующая водохранилище, несет ответственность.

Основные положения правил использования водных ресурсов включают данные о располагаемых водных ресурсах; характеристики водохранилища (регулирующая способность, морфологические и гидравлические характеристики, параметры, уровни); характеристики сооружений; состав водопотребителей, их основные требования к воде, порядок удовлетворения требований, нормативы расчетной обеспеченности; указания о порядке использования водных ресурсов (диспетчерские графики, порядок пропуска высоких вод через сооружения, рекомендации по использованию избытков воды и т. п.); мероприятия по борьбе с наносами; порядок гидрометеорологического обслуживания организаций, эксплуатирующих гидроузлы, эксплуатационных наблюдений, учета водных ресурсов, оповещения о водном режиме; указания по санитарной охране вод.

Для каскада водохранилищ также разрабатывают Основные положения правил использования водных ресурсов.

Выполнение правил контролируют органы по использованию и охране водных ресурсов.

При реализации разработанных в проекте режимов использования водных ресурсов водохранилищ возникают ситуации, когда проектные предложения осуществить трудно. В этих случаях, а также при

изменении условий регулирования стока Основные положения правил пересматривают в процессе эксплуатации гидроузла. Так, правила использования водных ресурсов водохранилищ Волжско-Камского каскада гидроузлов пересматривали несколько раз в связи с вводом в действие новых водохранилищ каскада.

Основные положения правил могут иметь приложения; схематический план бассейна; зависимости уровней воды в верхнем и нижнем бьефах от объема водохранилища и расхода воды, поступающей в нижний бьеф; диспетчерский график работы гидроузла; кривые зависимости пропускной способности водосбросов плотины от величины открытия затворов и т. д.

#### 24. ЭКСПЛУАТАЦИЯ КОМПЛЕКСНЫХ ГИДРОУЗЛОВ В ЗИМНИЙ ПЕРИОД

Удовлетворительная работа комплексных гидроузлов обусловлена рядом сложных и взаимосвязанных факторов.

Особенно сложна эксплуатация комплексных гидроузлов в зимний период, когда в верхнем и нижнем бьефах появляются различные ледовые образования. Так, ледяной покров в водохранилище обуславливает повышенное давление на гидротехнические сооружения; при переохлаждении металлических элементов водозаборов (сорудерживающих решеток, закладных элементов, пазов затворов и т. п.) на них образуется лед, в верхнем бьефе комплексного гидроузла возможно образование осенних зажоров (скопления подо льдом внутриводного льда) и весенних заторов (нагромождения битого льда) преимущественно в месте выклинивания кривой подпора водохранилища; в нижнем бьефе гидроузла зимой при работе ГЭС образуются майны (попыньи) значительных размеров (иногда до нескольких десятков километров), что способствует туманам, мешающим нормальной работе как самих гидроузлов, так и других народнохозяйственных объектов, населенных пунктов. Такие майны служат источником шуговых образований и битого льда, что при сочетании определенных условий может привести к зимним заторам и зажорам льда на водотоке, следовательно, к поднятию уровней воды в нижнем бьефе и снижению напора на гидроузле, а также к зимним наводнениям.

В тех случаях, когда на водотоке создан каскад комплексных гидроузлов, ледовые образования, изменяя пропускную способность русла в течение ледоставного периода, могут существенно затруднять передачу воды по каскаду и обеспечение водой участников ВХК.

Серьезные осложнения на реках и особенно деривационных каналах вызывают снежные заносы ледяного покрова. Дополнительные нагрузки на лед и его постепенное стаивание из-за изменения теплопроводности снежно-ледяного покрова уменьшают его толщину и разрушают покров, забивая живое сечение потока снежно-ледяной массой.

Заторы в НБ гидроузлов возможны из-за сбросов значительных объемов воды из водохранилища в период весенних половодий.

На деривационных гидроузлах вследствие неравномерной работы ГЭС разрушение ледяного покрова с последующей забивкой льдом живого сечения деривационного канала, водозаборов участников ВХК, напорного бассейна ГЭС может произойти в течение суток.

Таким образом, описанные здесь ледовые явления, как правило, приводят к дополнительным ущербам в отраслях народного хозяйства, являющихся участниками водохозяйственного комплекса.

Свести до минимума ущерб от ледовых явлений можно, назначив соответствующие режимы работы комплексных гидроузлов, которые зависят от сочетания множества факторов, определяющих различные ледовые явления. Факторы, определяющие возникновение и интенсивность ледовых явлений, можно разделить на три группы:

первая – географические (например, заторы чаще происходят на реках, текущих в меридианном направлении), климатические (атмосферное давление, скорость и направление ветра, температура и влажность воздуха, облачность, атмосферные осадки, продолжительность и интенсивность солнечной радиации, величина теплообмена между землей, водной поверхностью и атмосферой, затраты тепла, испарение и некоторые другие). Многие из перечисленных климатических характеристик взаимозависимы, поэтому для описания климата можно использовать интегральные показатели (различные комплексы, индексы и т. п.);

вторая – гидрологические (скорость течения, ширина и глубина потока, форма, уклон, площадь, озерность, залесенность речных сетей бассейна, толщина ледяного покрова и его прочность), гидрогеологические (уровень, расход и температура подземных вод) и морфологические (ширина, глубина, извилистость русла, наличие порогов, проток островов, конусов, выносов впадающих рек, стесненных участков водотока), характеристики бьефов гидроузла;

третья – условия работы гидроузлов и гидравлические характеристики бьефов. Это прежде всего объемы, условия водозаборов и возврата вод участниками водохозяйственных комплексов (включая расходы ГЭС и холостые сбросы в нижний бьеф гидроузлов), температура возвращаемой воды, величина наполнения и колебание уровней водохранилища, волнение на свободной поверхности воды, наличие гидроузлов выше и ниже по течению водотока, размеры льдин и др.

Важны не только сами факторы, но и последовательность их наступления, их сочетание. Так, место весеннего затора может прямо зависеть от места выклинивания кривой подпора водохранилища в период замерзания. Резкое изменение уклона дна водотока может быть причиной заторов и зажоров.

Можно выделить следующие методы управления работой комплексного гидроузла с минимальными ущербами и последствиями от

ледовых явлений: изменение режима работы гидротехнических и других сооружений водохозяйственных комплексов, влияющих на гидравлические и уровенные характеристики бьефов; введение ограничений на водопотребление и водоотведение; спрямление русл рек; разрушение или затопление порогов, островов, перекатов, затемнение ледяного покрова; ледакольные и ледовзрывные работы; создание лесозащитных полос и других средств для защиты от снега; обогрев сороудерживающих решеток и других металлических элементов водозаборов и водоприемников и др.

Выбор метода управления конкретными комплексными гидроузлами с минимальным возможным ущербом от ледовых явлений предполагает сбор, обработку и анализ результатов натуральных и лабораторных исследований, на основании которых получают расчетные зависимости, используемые при моделировании функционирования комплексных гидроузлов.

### *Контрольные вопросы и задания*

1. Какой методологический подход используют при проектировании гидроузла?
2. По какому признаку различают комплексные и отраслевые сооружения гидроузла?
3. Какую схему комплексного гидроузла следует применить, если требуемый напор на агрегатах ГЭС составляет 200 м; 800 м?
4. Могут ли комплексные гидроузлы обойтись без водохранилища?
5. Какое значение в отношении увязки водохозяйственного баланса имеет водохранилище?
6. Почему при разработке управления гидроузлом нельзя обойтись его математической моделью, но нужны еще и диспетчерские графики?
7. Почему в случае неопределенности оптимизацию выгодно начинать с наихудшего варианта?

# ОХРАНА ПРИРОДЫ



## Глава 7

### ОСНОВНЫЕ ЗАДАЧИ И ПОНЯТИЯ ОХРАНЫ ПРИРОДЫ

Тяжелое экологическое состояние современного мира обуславливается следующими причинами:

отсутствием жесткого экономического и законодательного регулирования деятельности природопользователей;

глобальным эгоизмом человечества на данном этапе его развития, разрушающим жизнь на Земле;

неэкономным расходом сырья, энергии и других природных ресурсов;

низким уровнем экологического образования и воспитания всего населения Земли (руководителей, исполнителей и др.);

отсутствием стоимости природных ресурсов;

"нездоровой" экономикой, порождающей "большую" экологию;

отсутствием повсеместной независимой экологической экспертизы проектов.

Охрана природы (ОП) – это плановая система государственных, международных, общественных, административно-хозяйственных, научно-технических, экономических и юридических мероприятий, направленных на поддержание благоприятных условий жизни для существующего и будущего поколений. В охрану природы входят мероприятия по рациональному использованию, сохранению и воспроизводству (естественных) ресурсов Земли и ближайшего к ней космоса.

Мероприятия по ОП делят на предупредительные и активные.

*Предупредительные мероприятия* – это создание условий для сохранения природного равновесия (устойчивости биогеоценозов) в различных регионах Земли. К таким мероприятиям относятся охрана ландшафтов, уникальных геологических образований, биологических сообществ и отдельных растений и животных. Для этого создают заповедники, природные (национальные) парки, заказники, охраняют памятники природы.

*Активные мероприятия* – это действия общества, направленные на предупреждение или устранение загрязнения атмосферы, воды и земли. Осуществляют их, разрабатывая технологии, обеспечивающие экономное расходование природных ресурсов (воздуха, воды, полезных ископаемых, биологических ресурсов).

#### 25. ПРИРОДНЫЕ РЕСУРСЫ

Природные ресурсы согласно Реймерсу (1982) – это естественные объекты и явления, способствующие воспроизводству трудовых



ресурсов, созданию материальных богатств, поддержанию условий существования человечества и росту качества жизни.

К природным ресурсам можно отнести:

средства труда (земля, водные пути, вода для орошения);

источники энергии (гидроэнергия, атомное топливо, запасы горючих ископаемых и т. д.);

сырье и материалы (минералы, лес, ресурсы технической воды);

некоторые предметы непосредственного потребления (питьевая вода, дикорастущие растения, грибы, продукты рыболовства);

рекреационные объекты (естественные места отдыха);

генофонд (виды, сорта и породы организмов);

естественные объекты, дающие информацию о состоянии внешней среды (ведущие палеонтологические формы, эталоны природы, биоиндикаторы и т. д.).

Качество природных ресурсов в результате хозяйственной деятельности может ухудшаться либо улучшаться. В связи с этим важно их разделение на возобновимые и невозобновимые.

*Возобновимые ресурсы* находятся в пределах биосферного кругооборота веществ. Они способны к самовосстановлению через размножение или природные циклы восстановления (например, растительность, животный мир, вода в реке, энергия воды, ветра и т. д.).

*Невозобновимые ресурсы* – почва, уголь, нефть и другие минеральные богатства.

Изменение состояния природных ресурсов всегда затрагивает прямо или косвенно биосферу, а следовательно, и интересы человечества.

## 26. БИОСФЕРА (ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ)

*Биосфера* – активная оболочка Земли, охватывающая нижнюю часть атмосферы, гидросферу и верхнюю часть литосферы, в которой совокупная деятельность живых организмов, в том числе человека, проявляется как геохимический фактор планетарного масштаба и значения, создающий целостную динамическую систему.

*Литосфера* – это твердая поверхность материков до глубины 3 км, *гидросфера* – водная оболочка Земли (70 % занимает Мировой океан), *атмосфера* – слой воздуха до высоты 25...30 км, т. е. до озонового слоя.

Основные особенности биосферы: наличие воды в жидком состоянии, единственного источника энергии (солнечная радиация).

Современное учение о биосфере создал академик В. И. Вернадский. Он доказал, что все три части биосферы связаны живым веществом, которое оказывает непрерывное воздействие на неживую природу.

Масса всех составляющих биосферы равна  $4 \cdot 10^{17}$  т, биомасса –  $10^{15}$  т, или 0,25 % массы всей биосферы, фитомасса –  $2,42 \cdot 10^{12}$  т, или 99 % всего живого вещества на Земле.

Деятельность биосферы сформировала современные условия Земли – современный состав атмосферы, почву, полезные ископаемые.

Основные функции живого вещества биосферы (по Лапо) приведены ниже.

| Функция          | Краткая характеристика происходящих процессов   |
|------------------|---|
| Энергетическая   | Поглощение солнечной энергии при фотосинтезе, а химической энергии – путем разложения энергонасыщенных веществ; передача энергии по пищевой цепи разнородного живого вещества |
| Концентрационная | Избирательное накопление в ходе жизнедеятельности определенных видов вещества: используемых для построения тела организма, удаляемых из него при метаболизме                  |
| Деструктивная    | Минерализация небиогенного органического вещества, разложение неживого неорганического вещества, вовлечение образовавшихся веществ в биологический круговорот                 |
| Средообразующая  | Преобразование физико-химических параметров среды (главным образом за счет небиогенного вещества)   |
| Транспортная     | Перенос вещества против градиента силы тяжести в горизонтальном направлении   |

Биосферу можно рассматривать как совокупность взаимодействующих биогеоценозов (экосистем).

*Биогеоценоз*, по В. Н. Сукачеву, – это участок земной поверхности с относительной однородностью условий обитания и определенным составом живых (биоценоз) и косных (приземный слой атмосферы, солнечная энергия, почва и др.) компонентов, между которыми происходит обмен веществом и энергией. Биогеоценоз – это биосфера в миниатюре.

Общая схема потоков вещества и энергии в экосистеме показана на рисунке 67.

Органическое вещество в биогеоценозах движется по пищевым (трофическим) цепям.

*Пищевой цепью* называют ряд организмов, в котором одни поедают предшественников по цепи и, в свою очередь, оказываются съеденными теми, которые следуют за ними.

Пищевая цепь состоит из следующих категорий организмов.

**Продуценты** (автотрофные организмы) – в основном хлорофиллоносные растения, образующие органическое вещество в процессе фотосинтеза под действием солнечных лучей. Основными продуцентами в наземных экосистемах являются зеленые цветковые растения, в водной среде – микроскопические планктонные водоросли.

**Консументы** (гетеротрофные организмы) – организмы – потребители органического вещества, созданного автотрофами. Первичные консументы – травоядные животные и паразиты зеленых растений (копытные, грызуны, насекомые, ракообразные, моллюски).

Вторичные консументы питаются травоядными животными (плотоядные или всеядные), а третичные – вторичными, т. е. хищниками хищников.

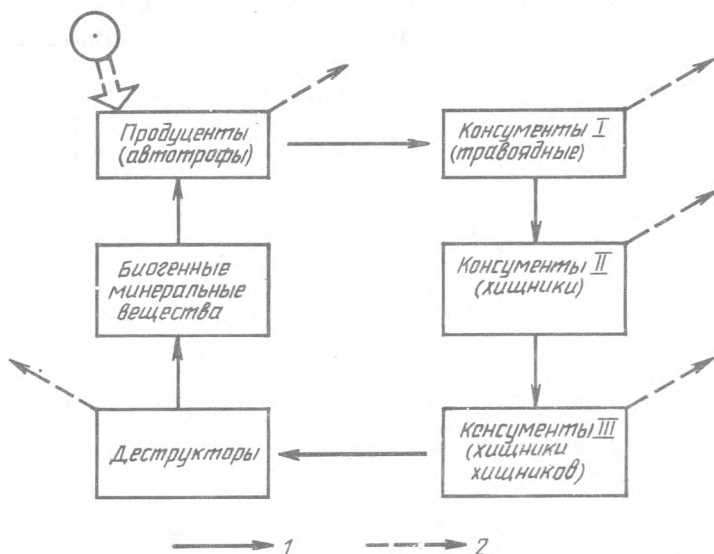


Рис. 67. Общая схема потоков вещества и энергии в экосистеме (Природа моделей, 1986):

1 — потоки вещества; 2 — потоки энергии

Деструкторы (биоредуценты) — организмы, разлагающие органические вещества, преимущественно микроорганизмы (бактерии, дрожжи, грибы-сапрофиты), поселяющиеся на отмерших организмах или продуктах их жизнедеятельности и разрушающие их.

Численности, биомассы и запасенная энергия организмов различных трофических уровней уменьшаются по мере продвижения к консументам высшего порядка, что можно представить в виде пирамиды (рис. 68).

Взаимодействие процессов, происходящих в биосфере, изображено в виде схемы, представленной на рисунке 69.

## 27. ПРИКЛАДНАЯ ЭКОЛОГИЯ

Поскольку процессы, происходящие в биосфере, подвергаются влиянию человеческой деятельности (см. рис. 69), современная экология должна давать возможность не только рассматривать изменения в биокосных системах Земли, но и выработать рекомендации по управлению этими изменениями. Поэтому появилась инженерная (прикладная) экология.

Предметом инженерной экологии является рассмотрение не только природных объектов и процессов, но и процессов, связанных с человеческой активностью.

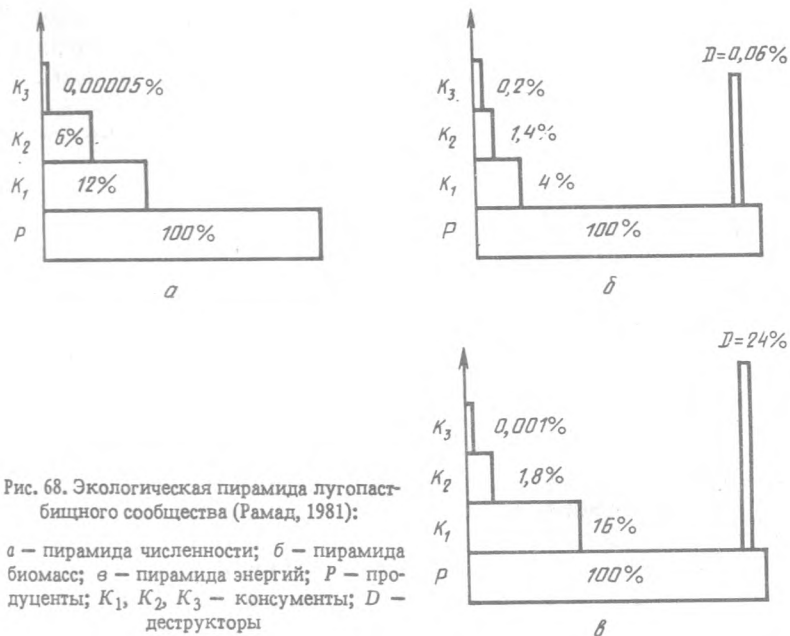


Рис. 68. Экологическая пирамида лугопастбищного сообщества (Рамад, 1981):

а — пирамида численности; б — пирамида биомасс; в — пирамида энергий; P — продуценты; K<sub>1</sub>, K<sub>2</sub>, K<sub>3</sub> — консументы; D — деструкторы

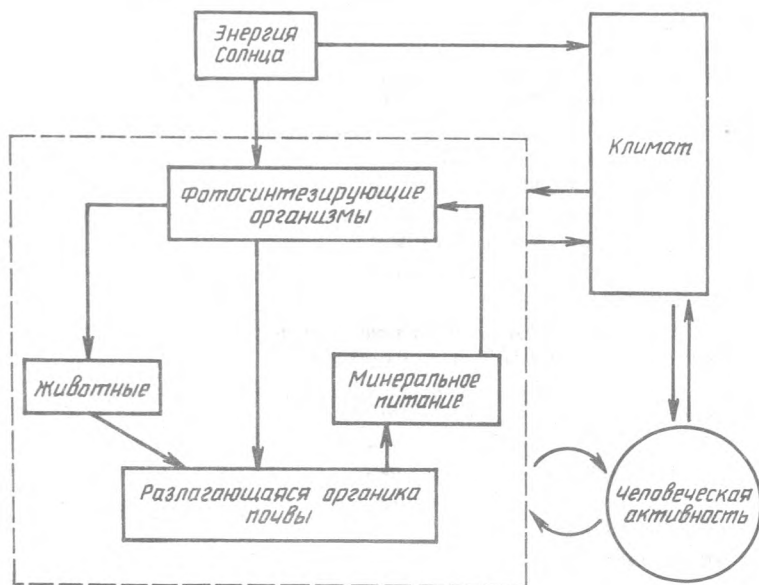


Рис. 69. Схема взаимодействия процессов, происходящих в биосфере

*Цель инженерной экологии* — применять к запросам инженерной и аграрной практики постулаты общей биологии и естествознания в целом и способствовать оптимизации взаимодействия человека с природными экосистемами. При этом нужно учитывать естественноисторические, а также общественно-политические, технико-экономические и этические предпосылки.

## 28. СООТНОШЕНИЕ ОСНОВНЫХ ПРОГНОЗИРУЕМЫХ ПАРАМЕТРОВ ЭКОСИСТЕМ

Качественные закономерности, характеризующие особенности поведения (функционирования, развития и устойчивости к воздействию) экосистем в условиях их трансформации (Федоров, 1983), могут быть выражены тремя постулатами.

*I постулат.* Структура  $\Sigma$ , экосистема изменяются быстрее, чем видовой состав  $X$ .

*II постулат.* Функциональная активность  $F$  экосистемы, т.е. внешнее проявление ее свойств, меняется медленнее, чем видовой состав  $X$ , и еще медленнее, чем структура  $\Sigma$ .

Наблюдения показывают, что по мере сокращения видового состава экосистемы ресурсы среды обитания распределяются между оставшимися популяциями и они полнее реализуют свой биотический потенциал, увеличивая максимальную численность в занимаемых ареалах. Этот механизм позволяет экосистеме сохранять внешние параметры состояния и относительно медленно трансформировать свое функционирование.

*III постулат.* Надежность функционирования (экологическая упругость —  $R$ ) экосистемы как интегральная характеристика степени сохранения ее свойств следует за изменениями структуры  $\Sigma$  и видового состава  $X$ . Другими словами, функции экосистемы  $R$  сохраняются даже при изменении видового состава  $X$  и структуры  $\Sigma$ .

Фактический видовой состав характеризуется долей сохранения числа видов организмов в экосистеме:

$$X \leftrightarrow P_x = X/X_{\max}, \quad (192)$$

где  $P_x$  — вероятность (доля) сохранения исходного видового состава;  $X$  — фактическое число видов;  $X_{\max}$  — исходное число видов в экосистеме.

Структура экосистемы характеризуется степенью сохранения межвидовых взаимосвязей:

$$\Sigma \leftrightarrow P_{\Sigma} = \Sigma/\Sigma_{\max}, \quad (193)$$

где  $P_{\Sigma}$  — вероятность (доля) сохранения исходных межвидовых взаимосвязей;  $\Sigma$  — фактическое число взаимосвязей,  $\Sigma = C_x^2 = \frac{X(X - X_1)}{2}$ ;  $C_x^2$  — число сочетаний из  $x$  элементов по 2;  $\Sigma_{\max}$  — исходное число межвидовых взаимосвязей.

Фактическая и исходная функциональная активности экосистемы

характеризуются соответствующими законами распределения количественных показателей ее свойств:

$$\rho = \rho(\varphi),$$

которые, как уже отмечалось, одновременно выражают требования экосистемы к условиям среды до и после произошедших в ней изменений.

Экологическая упругость определяется двумя взаимосвязанными факторами, нарушение которых приводит к отказу функционирования экосистемы, а следовательно, рассчитывают ее по схеме зависимых событий:

$$P_R = 1 - Q_x Q_\Sigma = P_x + P_\Sigma - P_x P_\Sigma, \quad (194)$$

где  $P_R$  — надежность функционирования, т. е. вероятность (доля) сохранения исходных свойств (требований) экосистемы в изменившейся обстановке;  $Q_x$  — вероятность (доля) нарушения исходного видового состава экосистемы,  $Q_\Sigma = 1 - P_x$ ;  $P_\Sigma$  — вероятность (доля) нарушения исходных межвидовых взаимосвязей в экосистеме,  $Q_\Sigma = 1 - P_\Sigma$ .

Рассмотрим состояния экосистемы, находящейся на различных стадиях разрушения, информация о которых представлена в таблицах 17 и 18.

*Ситуация 1.* Видовой состав и функции у неповрежденной экосистемы стабильны:

$$X_0 = \text{const}, F_0 = \text{const}. \quad (195)$$

*Ситуация 2.* Первая стадия разрушения (стадия ослабления, или релаксации). Характеризуется (см. табл. 17) потерей 20...40 %  $\approx$  25 % видового состава и разрывом 40...60 %  $\approx$  50 % исходного числа связей, но фактическим сохранением ( $\Delta F \approx \Delta R = 8...28\% \approx 10\%$ ) функциональной активности экосистемы:

$$X_0 \rightarrow X_1 < X_0; F_0 \rightarrow F_1 \approx \text{const} = F_0. \quad (196)$$

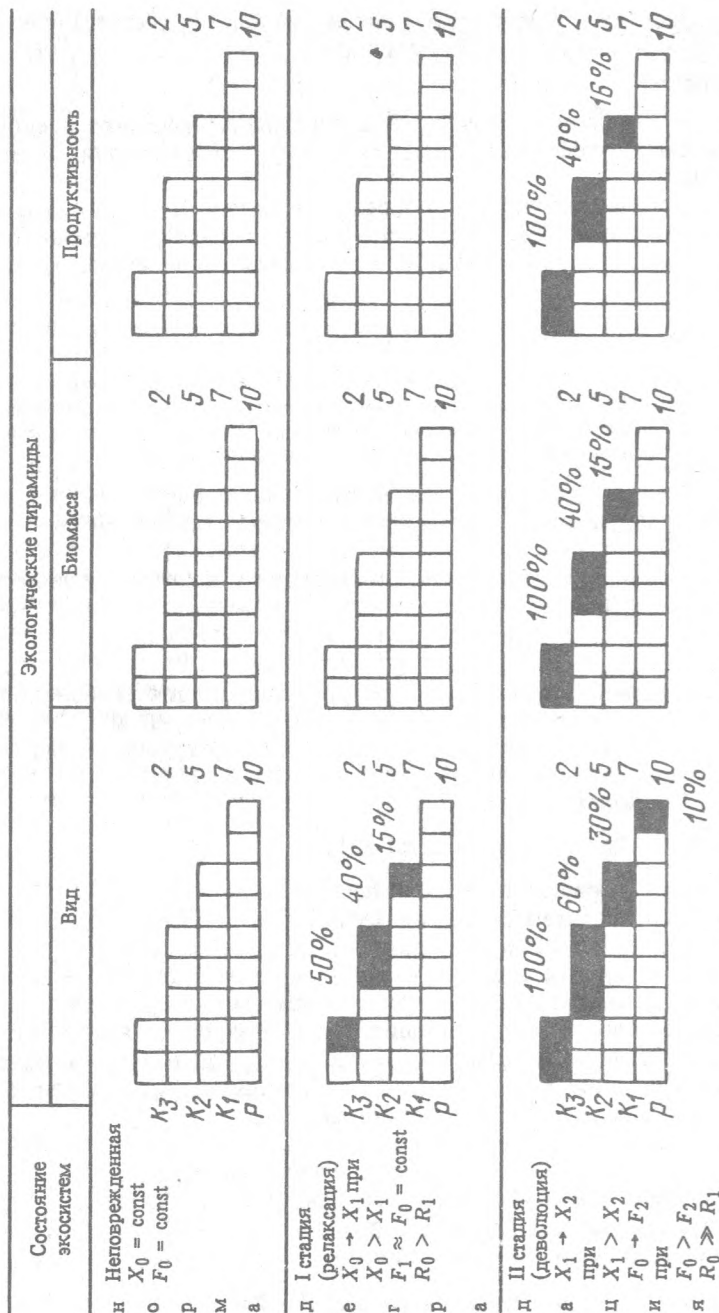
Темпы сокращения числа связей (разрушения структуры) вдвое превышают, а темпы снижения функциональной активности на 40 % отстают от темпов изменения видового состава экосистемы.

Восстановление звеньев, утерянных на этой стадии разрушения, еще существенно не перестраивает экосистему, т. е. изменения в ней обратимы. Экосистема находится в квазистойчивом состоянии, соответствующем темпам когерентной (постепенной) эволюции, при которой прежние виды плавно вытесняются новыми, более приспособленными к изменившимся условиям среды.

*Ситуации 3...6.* Вторая стадия разрушения (стадия вырождения, или деволуции). Характеризуется существенным (40...100 %  $\approx$  70 %) обеднением исходного видового состава, дальнейшем разрывом структурных связей (60...100 %  $\approx$  88 %) и резким (28...100 %  $\approx$  66 %) снижением функциональной активности экосистемы:

$$X_1 > X_2; X_1 \rightarrow X_2 \ll X_0; F_1 \rightarrow F_2 < F_1 \approx F_0. \quad (197)$$

17. Изменение в экологических пирамидах при разрушении экосистем (для гипотетической системы из четырех трофических уровней для продуцентов, консументов и хищников)



Примечание. Р – продуценты;  $K_1$  – консументы первого порядка (фитофаги);  $K_2$  – консументы второго порядка (зоофаги);  $K_3$  – консументы третьего порядка (хищники хищников).

Темпы сокращения структурных связей ( $\sim 88\%$ ) по-прежнему опережают, а темпы снижения функциональной активности ( $\sim 66\%$ ) отстают от темпов изменения видового состава ( $\sim 70\%$ ) экосистемы, хотя разрыв между ними по сравнению с предыдущей стадией разрушения экосистемы сокращается. В целом же на стадии вырождения темпы разрушения экосистемы катастрофически ( $66\ldots 70\ldots 88\% \approx 75\%$ ) велики, почти вдвое превышают соответствующие показатели ( $28\ldots 40\ldots 60\% \approx 40\%$ ) для стадии релаксации. Восстановление звеньев, утраченных на этой стадии разрушения экосистемы, естественным порядком практически невозможно. Взамен вымирающих в экосистему устремляются менее организованные, но индивидуально более устойчивые виды. Гомеостаз (устойчивость) экосистемы в целом (см. ситуацию б) теряется, что соответствует некогерентной эволюции (деволюции). Однако через достаточно продолжительный отрезок времени ареалы заполняются организмами вновь до максимальной возможной численности популяций. Новая экосистема, приобретая устойчивость, опять переходит в стадию когерентной эволюции, повторяя уже на другом уровне цикл индивидуального развития.

Изменения внутреннего состояния на различных стадиях разрушения экосистемы представлены в таблице 18.

В период релаксации экосистемы под воздействием человека происходит выпадение ряда видов. Однако система в целом и на уровне трофических группировок существенно не изменяет ни пейзажности, ни величин, характеризующих скорость новообразования органического вещества. Хотя внешне система кажется мало измененной, но заметно снижаются ее сопротивляемость и иммунитет к загрязнению, возрастает вероятность "заболевания".







В период деволюции происходит дальнейшее выпадение видов. Нарушение структуры затрагивает компенсаторные механизмы. Вследствие этого наблюдается существенное изменение величин функциональных показателей, относящихся к различным трофическим группировкам. Существенно меняется пейзажность системы. Происходит выпадение крупных форм и заметное изменение биомассы. Особенно информативным в период второй стадии оказывается не столько снижение суммарной биомассы сообщества в целом, сколько сопоставление интегральных биомасс организмов различных трофических уровней. Изменения в экологических пирамидах при разных уровнях деградации можно видеть в таблице 17.

В стадии релаксации биоценоз обедняется видами конечных звеньев трофической цепи (50% – хищников, 40% – зоофагов и 15% – фитофагов) при общем сохранении уровня биомассы и продуктивности всех трофических уровней экосистемы.

В стадии деволюции наблюдается обеднение видового богатства всех трофических цепей. Доля "обеднения" возрастает от первичных продуцентов к хищникам, %: 100 – хищников, 60 – зоофагов, 30 – фитофагов и 10 – первичных продуцентов. При этом одновременно



## 18. Соотношение основных параметров состояния

| Стадия разрушения и состояние экосистемы | Ситуация | Число видов организмов в экосистеме X | Граф ситуации   | Число межвидовых связей $\Sigma = C_x^2$ | Вероятности                                  |   |  |
|--|----------|---------------------------------------|---|--|--|---|--|
|  |          |                                       |   |  | Сохранения состава $P_x = \frac{x}{x(\max)}$ | Сохранения структуры $P_\Sigma = \frac{\Sigma}{\Sigma(\max)}$ | Надежности функционирования $P_R = 1 - q_x q_\Sigma$ |
| Устойчивая экосистема                    | 1        | 5                                     |    | 10                                       | 1,0  | 1,0   | 1,0  |
| I стадия (релаксация) квазиустойчивая    | 2        | 4                                     |    | 6  | 0,8  | 0,6   | 0,92   |
| II стадия (деволюция)                    | 3        | 3                                     |    | 3  | 0,6  | 0,3   | 0,72   |
| Неустойчивая экосистема                  | 4        | 2                                     |    | 1  | 0,4  | 0,1   | 0,46   |
|  | 5        | 1                                     |  | 0  | 0,2  | 0   | 0,2  |
|  | 6        | 0                                     |  | 0  | 0  | 0   | 0  |
| Средние темпы изменения:                 |          |                                       |   |  |  |   |  |

снижается продуктивность трофической цепи и ее биомассы, что неизбежно меняет пейзажность экосистемы.

Результаты расчета основных параметров состояния на разных стадиях деградации экосистемы (см. табл. 18) показывают, что количественные соотношения изменения этих характеристик отражают

на различных стадиях разрушения экосистемы

| состояния                                    |   |  | Сокращение<br>состава<br>$\frac{P_x^{иск} - P_x}{P_x^{иск}}$ ,<br>% | Сокращение<br>числа<br>связей<br>$\frac{P_\Sigma^{иск} - P_\Sigma}{P_\Sigma^{иск}}$ ,<br>% | Снижение<br>надежности<br>функциони-<br>рования<br>$\frac{P_R^{иск} - P_R}{P_R^{иск}}$ ,<br>% | Средние<br>темпы из-<br>менения<br>параметров<br>состояния<br>экосистемы,<br>% |
|--|---|--|---|--|---|--|
| Изме-<br>нения<br>состава<br>$q_x = 1 - P_x$ | Изме-<br>нения<br>струк-<br>туры<br>$q_\Sigma = 1 - P_\Sigma$ | Изме-<br>нения<br>функцио-<br>нирова-<br>ния<br>$q_R = q_x q_\Sigma$ |   |  |   |  |
| 0  | 0   | 0  | 0   | 0  | 0   | 0  |
| 0,2  | 0,4   | 0,08   | 20  | 40   | 8   |  |
| 0,4  | 0,7   | 0,28   | 40  | 60   | 28  | 40   |
| 0,6  | 0,9   | 0,54   | 60  | 90   | 54  |  |
| 0,8  | 1,0   | 0,8  | 80  | 100  | 80  | 75   |
| 1,0  | 1,0   | 1,0  | 100   | 100  | 100   |  |
|  |   |  | 50  | 65   | 45  |  |

качественные закономерности, выражаемые I...III постулатами: самой динамичной частью является структура экосистемы (изменяется в среднем на 65%), затем – видовой состав (в среднем меняется на 50%), после него – надежность функционирования (изменяется на 45%).

Однако структуру и состав реальных экосистем не всегда можно

изучить, а также оценить их состояние в связи с трудностью сбора и обработки колоссальных массивов информации. Поэтому функциональный подход в этом случае оказывается более плодотворным для инженерных целей, поскольку не требует изучения внутреннего строения экосистемы. Здесь рассматривается только внешнее проявление свойств системы, т. е. ее функциональная активность, характеризующаяся законами распределения интересующих нас параметров состояния, а уже по их изменению оценивается экологическая упругость экосистемы.

Однофакторная надежность функционирования в этом случае характеризуется долей сохранившихся исходных требований экосистемы к данному фактору среды.

Устойчивые экосистемы имеют достаточно стабильные состав и структуру, что и определяет некоторое постоянство пропорций, соотношений между вовлекаемыми с их помощью в биологический круговорот количествами вещества и энергии. Поэтому при недостатке какого-либо элемента состояние всей системы, характеризующее экологическую упругость, будет определяться дефицитом именно этого элемента, а общая надежность функционирования экосистемы в соответствии с законом лимитирующего фактора — минимальной величиной из всего обследуемого комплекса показателей состояния:

$$P_R = \min_i P_i \quad (198)$$

где  $P_R$  — экологическая упругость экосистемы.

Это количественное соотношение передает содержание II постулата, поскольку уровень функциональной активности, выражаемый всеми законами распределения ее характеристик, оказывается не ниже уровня надежности сохранения свойств экосистемы.

Оценка состояния водной экосистемы рек Северной Эстонии в створах, подвергающихся загрязнению сточными водами, показывает, что исходная экосистема находится на II стадии разрушения. При этом в загрязненных водах должна происходить катастрофически резкая смена видового состава организмов на более примитивные формы.

## 29. ЭКОЛОГИЧЕСКИЙ ПРОГНОЗ

Для управления экологической системой необходим экологический прогноз, который позволяет предсказывать ситуации в условиях складывающихся изменений биосферы.

Общий экологический прогноз включает следующие частные прогнозы:

видового состава и запасов биогенных элементов;

изменения связей между элементами экосистемы;

изменения во времени свойств элементов и параметров экосистемы в результате ее функционирования;

надежности функционирования как способности сохранять внутренне взаимосвязи (т. е. сохранение структуры и потока энергии и вещества) при возмущении системы, вызванном внесистемным воздействием.

Таким образом, экологический прогноз – это предсказание изменений природных экосистем, их состава и структуры, а также уровня функционирования и степени устойчивости к неблагоприятному воздействию.

## 30. РАЦИОНАЛЬНОЕ ПРИРОДОПОЛЬЗОВАНИЕ

### 30.1. Возможные экологические конфликты

В настоящее время в мире существует огромный разрыв между тем, как надо, как можно и как есть в окружающем мире. В конце XIX – начале XX века человечество получило практически неограниченные технические возможности удовлетворения своих потребностей. Попытка удовлетворить непомерно растущие потребности, насытить рынок товарами, изготавливаемыми прежними технологическими приемами, породила серию кризисов: продовольственный – нехватка белков для растущего населения; энергетический, связанный с уменьшением запасов легкодобываемого топлива; экологический, объясняемый неоправданной экономией средств на строительстве очистных сооружений и игнорированием требований экосистем.

Земля может прокормить 10...12 млрд человек, и нет принципиального дефицита энергоисточников. Вместе с тем стало ясно, что повсеместное сооружение очистных сооружений не спасет Землю от экологических потрясений, которые по разрушительности можно сравнивать с военными катастрофами или аварийными ситуациями. Только в энергетической сфере в мире добывают, транспортируют, хранят и используют около  $10 \cdot 10^9$  т условного топлива, что сравнимо по своему разрушительному действию с арсеналом современного оружия. Отравляющие химические компоненты, такие, как мышьяк, барий, фосген, аммиак, синильная кислота, перерабатывают, хранят и перевозят в количествах, составляющих от сотен миллиардов до триллионов летальных доз. Это на два порядка выше накопленных радиосактивных веществ.

Существующее промышленное и сельскохозяйственное производство основывалось в основном на создании мощных монопредприятий: горнодобывающих, металлургических, химических и т. д. Поэтому на каждом из них извлекались только те компоненты, которые необходимы были данному предприятию, все остальные ценные вещества из природных материалов шли в отходы: хранимые, сбрасываемые, скрываемые.

## 30.2. Экологизация производства

Наибольшую тревогу вызывает технологический кризис, обусловленный некомплексным использованием сырья в существующих технологиях и приводящий к неоправданно большим потерям при производстве.

В ряде стран делают шаг в сторону новой технологической эры – созданию и внедрению робототехнических устройств, совершенных систем коммуникаций, массовой компьютеризации, созданию новых материалов на керамической, полимерной и композиционной основах, что на 25...30 % снизило потребность в энергии и материалах. В нашей стране на производство стали, алюминия, цемента, бумаги затрачивается на 25...30 % энергии больше, чем на лучших мировых производствах.

Однако даже в лучших мировых технологиях энергоемкость превышает теоретический показатель: для стали – в 4 раза, для цемента – в 5, для алюминия – в 6, для переработки нефти – в 9, а для производства бумаги – в 125 раз.

Эти примеры показывают, насколько существующая технология отстает от идеала и какие огромные резервы существуют. В то же время ясно, что эволюционное совершенствование хорошо отработанной техники и технологии не дает значительного улучшения.

Основное направление в разработке новых технологий должно быть следующим: максимальная замена дифференциальной структуры производства и потребления сырья и энергии на интегрированные энерготехнологические схемы, позволяющие вести процессы более экономно, безопасно и безотходно с использованием синергических эффектов.

Аналогом построения таких систем могут быть природные экологические системы. Для этого производственные системы должны быть построены из компактных элементов многоцелевого назначения. В таких системах производство энергии, ее транспортирование и использование должны быть в едином замкнутом цикле. В противном случае производственные системы получают чрезвычайно громоздкими, опасными и создают избыточные потоки сырья и энергии. Перспективно и совмещение различных процессов.

Основные принципы природопользования должны включать цели, связанные с надежным функционированием, обеспечивающим сохранение окружающей среды. Производственная система должна быть замкнутой, такой, как сама жизнь на Земле, т. е. аналогичная системе растения – животные – микроорганизмы.

Открытые (незамкнутые) системы могут существовать достаточно продолжительное время лишь в малых формах.

Управление использованием природных систем включает:

определение стандартов качества окружающей среды и сроки их достижения;

выбор стратегии использования данного природного ресурса и программы технической перестройки производства;

систему административного управления (органы управления использованием природных комплексов в центре и на местах);

систему мер экономического регулирования (определение стоимости возобновляемых природных ресурсов и установление оплаты за пользование данными ресурсами);

формы привлечения общественности к решению задачи охраны природы.

В области использования водных ресурсов необходимо проводить: коренную техническую перестройку производства, направленную на резкое сокращение водопотребления. Переход от технологии очищения и разбавления отходов к малоотходной технологии и технологии оборотного использования воды;

перестройку ирригационных систем, создание закрытых распределительных каналов, применение совершенных методов орошения, оптимизацию распределения водных ресурсов;

изменение структуры и размещения промышленного и сельскохозяйственного производства с учетом масштабов водных ресурсов каждого региона;

снижение расхода водных ресурсов на единицу конечного продукта.

В области *использования (загрязнения) атмосферы*:

отказ от практики рассеивания газообразных отходов.

В области *сохранения почв*:

широкое внедрение севооборотов при достаточно выверенных границах применения химии;

минимальную или бесплатную обработку земель, при которой на полях сохраняется значительное количество жнивья, хорошо предохраняющего почву от вымывания и выдувания и не разрушающего колонии деструкторов;

создание лесозащитных полос по возможности из хвойных пород, таких, как сосна, ель, можжевельник;

контролирование выносов (установление обоснованной сбалансированности поголовья скота и продуктивности пастбищ).

Для *реализации экологических технологий* необходимо создание администрации территориальных природных зон, установление квоты пользования природными ресурсами для каждого предприятия.

План предприятия можно считать выполненным, если оно строго укладывается в заданные квоты природопользования.

Предполагается, что хозяйственные организации будут заключать с администрацией территориальных природных зон договоры на использование природных ресурсов (для водных ресурсов это Бассейновые соглашения). В этих договорах оговаривают:

условия природопользования (плата за использование природных ресурсов, формы контроля, санкции за нарушение условий приро-

допользования: штрафы, административные меры – частичное или полное прекращение производства);

отчисления от прибылей предприятий, направляемые на выполнение программы развития социальной инфраструктуры и поддержание здоровой среды обитания;

по программам сохранения окружающей среды администрации должны быть подчинены республиканским комитетам охраны природы, а последние – общесоюзному органу.

### 30.3. Специфические черты технологии экологизированного производства

Воспроизводство природной среды становится особенной фазой производства средств жизни. При нарушении природного равновесия необходимо прибегать к восстановительной фазе, обеспечивающей самовосстановление природных и продолжение производственных процессов.

Экологическая технология должна быть направлена не на технологическое преобразование природных сил, а на оптимизацию взаимодействия с природой в направлении стимулирования ее развития по принципу самовосстановления.

Экологизация производства – это разумное преобразование природы в соответствии с требованиями экологических и производственных законов через оптимальное сочетание природных экосистем с общественно-технологическими, что обеспечивает нормальное функционирование формирующейся планетарной биосоциальной системы.

Экологизированное производство должно включать воспроизводство всего комплекса природных ресурсов по возможности с полным использованием исходного вещества (без каких бы то ни было отходов). Отраслевая структура производства не позволяет комплексно использовать природные ресурсы.

Экологизированное производство должно быть основано на замкнутом производственном цикле, развитие материального производства – на принципах эволюции жизни на Земле. В современном же производстве доминируют дискретные линейные процессы (сырье – продукция – отходы).

#### *Контрольные вопросы и задания*

1. В чем коренное отличие влияния на природу хозяйственной деятельности человека и популяции организмов иного вида? Какова в этой связи основная задача природоохранной деятельности?
2. Из каких соображений назначают допустимые уровни воздействий на природные объекты? Что произойдет с экосистемой, если нагрузки на нее будут выше предельно допустимых?
3. Можно ли отнести к биосфере грунтовые воды, атомный реактор, дно Марианской впадины, космический корабль?
4. Какое содержание вкладывают в понятие "экологизация производства"?
5. Какие методы оценки степени нарушения исходного состояния экосистемы вы знаете?
6. Что происходит в экосистеме, если надежность сохранения ею исходных функций после воздействий на нее упала до 0,95; 0,85?

## Глава 8

### МЕЛИОРАЦИЯ И ОХРАНА ПРИРОДЫ

#### 31. ВЛИЯНИЕ МЕЛИОРАЦИИ НА ПРИРОДУ

Исторические причины возникновения экологических противоречий в мелиорации были следующие:

великое переселение народов и переселение культурных растений из зоны происхождения в другие зоны;

необходимость мелиорации для создания оптимальных условий растениям-“переселенцам”;

изменение при мелиорации естественного почвообразовательного процесса и замена его новым под воздействием мелиоративных режимов.

Исходя из основной задачи мелиорации – управления круговоротом воды и зольных элементов таким образом, чтобы они переходили из геологического оборота в биологический, – нужно рассматривать мелиорацию не только как экономическую акцию, но и как оптимизацию экологических систем биосферы.

Таким образом, мелиорация должна быть составной частью рационального природопользования, т.е. именно при мелиорации земель возможна наиболее полная экологизация технологий, основой которой являются использование природных механизмов аккумуляции солнечной энергии и перевод потоков минеральных веществ из геологического круговорота в биологический.

Исходя из этого, при проектировании и эксплуатации объектов мелиорации необходимо предусматривать мероприятия, обеспечивающие оптимальное взаимодействие естественных и искусственных биогеоценозов, так чтобы суммарная энергия Солнца, поглощенная всем комплексом, была максимальной. При этом должны соблюдаться условия сохранения видового состава, увеличиваться устойчивость экосистемы и продуктивность агроценоза.

Если достичь этого невозможно, то, по крайней мере, нужно стремиться к сохранению всех компонентов природы, расположенных как в пределах мелиоративной системы, так и на прилегающих территориях: земля (почва и недра), воды (поверхностные и подземные), воздушная среда, растительность, животный мир, ландшафты, памятники природы, истории и искусства (Руководство, 1981).

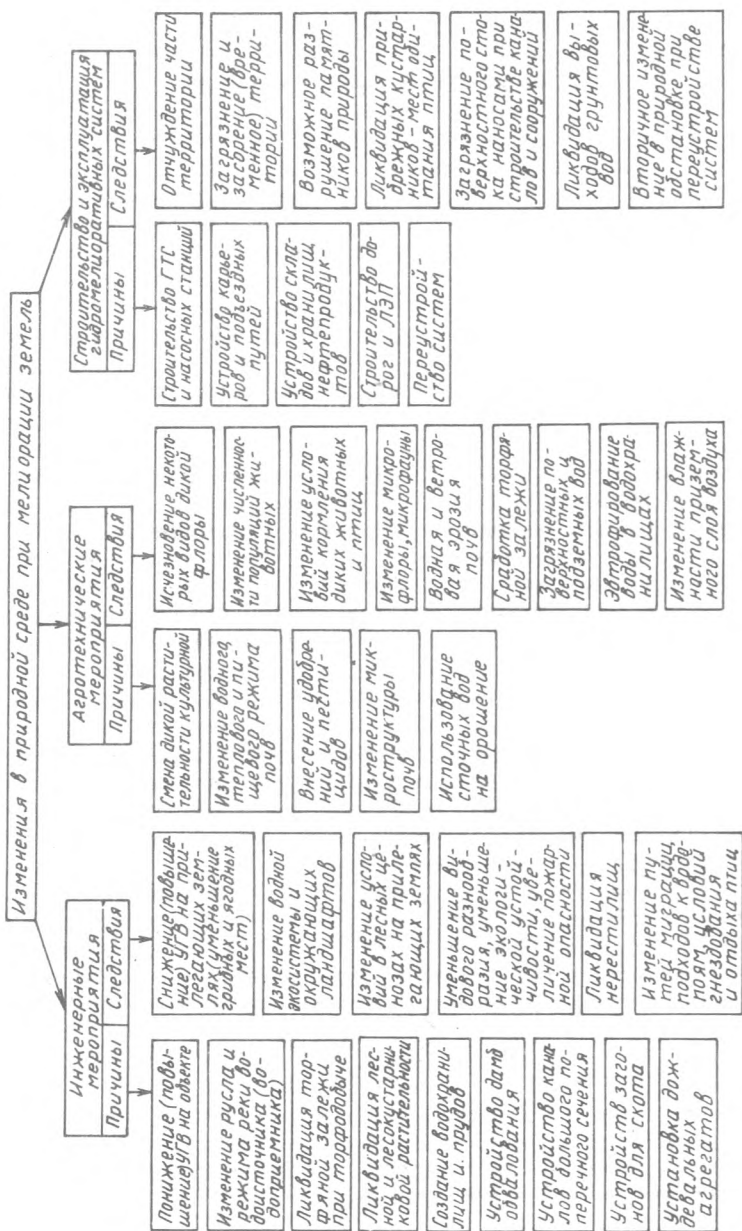
Влияние мелиорации на окружающую среду проявляется в следующем:

в перераспределении стока во времени (например, при осушении или создании водохранилища для орошения) и в пространстве [уменьшение стока в одних районах – водозабор для орошения и увеличение подземного (дренажного) стока в других];

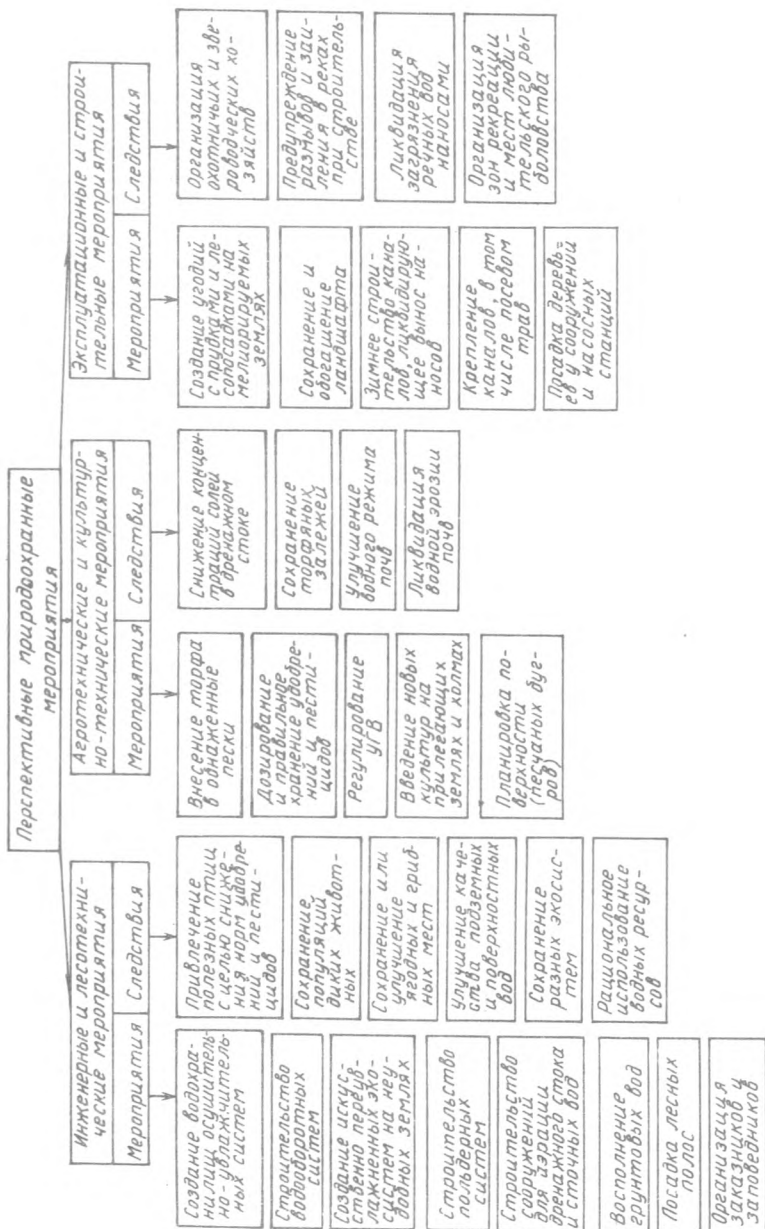
загрязнении поверхностных и подземных вод дренажным стоком; поверхностной водной эрозии почв;



19. Возможные изменения в окружающей среде под влиянием мелиорации



## 20. Природоохранные мероприятия при мелиорации



деградации почв (внутренняя эрозия, особенно при орошении черноземов);

подтоплении или пересушке почв при изменении уровней грунтовых вод;

засолении почв.

Все это может привести к исчезновению отдельных видов флоры и фауны, значительному снижению численности видов и популяций диких животных, изменению природных факторов (климат, гидрогеологические условия, тепловой, водный и другие режимы), изменению условий комфорта жителей конкретной местности.

Возможные изменения в окружающей среде под влиянием мелиораций и мероприятия, необходимые для предотвращения этих изменений, показаны в таблицах 19 и 20.

### 32. ЗОНЫ ВЛИЯНИЯ МЕЛИОРАТИВНЫХ СИСТЕМ НА ПРИРОДНУЮ СРЕДУ

Условно можно выделить пять зон влияния мелиоративных систем на природную среду (рис. 70, 71):

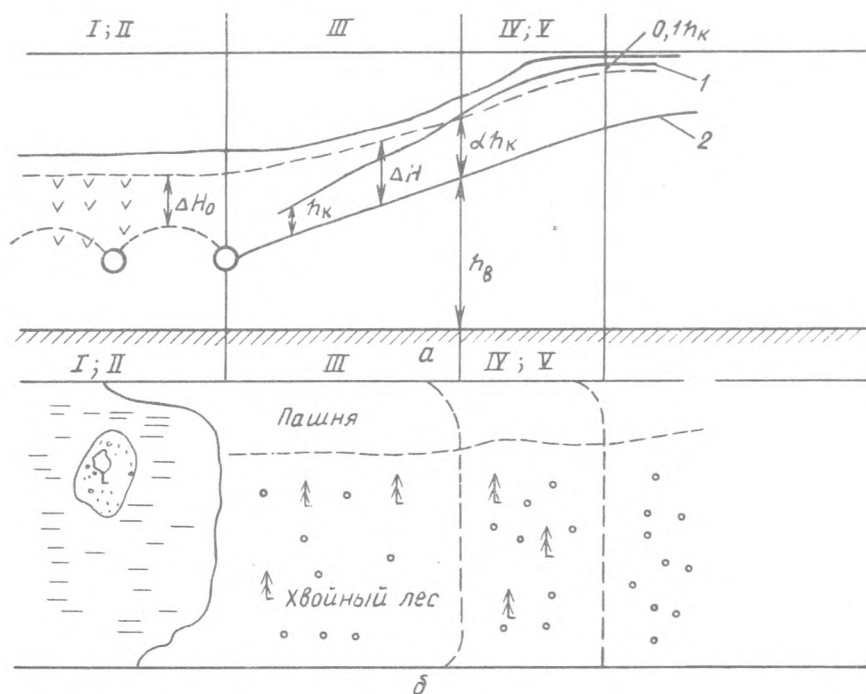


Рис. 70. Зоны влияния мелиоративных объектов на природную среду (гумидная зона): а — разрез; б — план; I...IV — зоны влияния (пояснения в тексте); 1, 2 — кривая депрессии до и после осушения

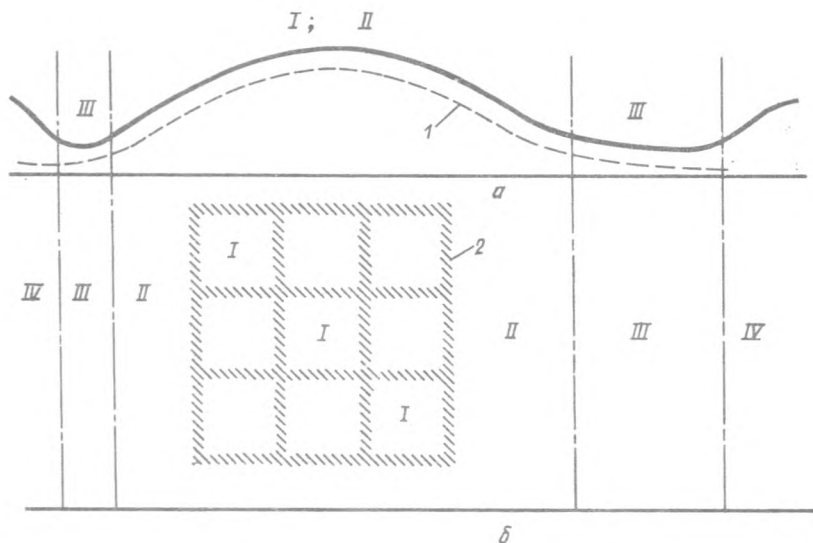


Рис. 71. Зоны влияния объектов орошения:

*a* — разрез; *б* — план; I...V — зоны влияния (пояснения в тексте); 1 — уровень грунтовых вод; 2 — лес

I — зона мелиоративного объекта, т. е. площадь самого объекта;

II — внутренняя зона, охватывающая немелиорируемые площади в контурах объекта мелиорации (земли, имеющие отметки на 1 м выше средних отметок мелиорируемой территории и внешнюю форму в виде холмов и гряд);

III — непосредственно прилегающая зона влияния; внутренняя граница — граница заболоченной (орошаемой) и прилегающих территорий (резкое повышение рельефа, границы торфяной залежи), внешняя граница — капиллярная кайма отрывается от депрессионной поверхности;

IV — отдаленная зона влияния;

V — зона воздушного пространства в контурах отдаленной IV зоны.

Природоохранные мероприятия в этих зонах могут быть различными.

Границы зон можно установить приблизительно, так как время проявления заметных изменений в природной среде весьма растянуто. В первую очередь это относится к III и IV зонам.

Основные признаки выделения зон: уровень грунтовых вод и рельеф объекта прилегающей территории; дополнительные: локальные понижения рельефа прилегающей территории и локальные возвышенности на объекте мелиорации, механический состав и высота капиллярного поднятия грунтов, наличие почвенного покрова и тип почв,

доминирующая растительность на прилегающих землях (лесная, луговая, поля севооборота), общее направление потока грунтовых вод (в сторону объекта мелиорации или от него), химический состав грунтовых вод.

### 33. ПРОГНОЗ ИЗМЕНЕНИЯ УСЛОВИЙ ВНЕШНЕЙ СРЕДЫ ПОД ВЛИЯНИЕМ МЕЛИОРАЦИИ

#### 33.1. Изменение уровня грунтовых вод

Изменение уровня грунтовых вод в зависимости от расстояния до осушаемого болота можно найти по экспериментальной кривой либо по формуле С. Ф. Аверьянова

$$\Delta H = \Delta H_0 \operatorname{erfc}(z), \quad (199)$$

где  $\Delta H$  — снижение уровня грунтовых вод в расчетной точке, м;  $\Delta H_0$  — снижение уровня грунтовых вод на границе мелиоративной системы, м;  $\operatorname{erfc}$  — специальная табулированная функция;  $z$  — величина, равная  $x/2\sqrt{at}$  (здесь  $x$  — расстояние расчетной точки на кривой депрессии от границы мелиоративной системы, м;  $a$  — коэффициент уводнепроводности,  $\text{м}^2/\text{сут}$ ,

$$a = \frac{K h_{\text{в}}}{\mu}, \quad (100)$$

$K$  — коэффициент фильтрации грунта, м/сут;  $h_{\text{в}}$  — средняя мощность водонасыщенного пласта, м;  $\mu$  — коэффициент водоотдачи грунта;  $t$  — время от начала снижения УГВ, сут).

На прилегающей к мелиоративной системе территории в зависимости от положения уровня грунтовых вод уменьшается при осушении и увеличивается при орошении физическое испарение (испарение с поверхности почвы, не занятой растениями):

$$E = E_0(1 - H/H_K)^n, \quad (201)$$

где  $E$  — испарение с поверхности почвы, мм;  $E_0$  — испаряемость (испарение с поверхности воды), мм;  $H$  — глубина залегания грунтовых вод, м;  $H_K$  — глубина залегания грунтовых вод, при которой начинается практически заметное испарение (ее величину можно принять равной высоте капиллярного поднятия), м;  $n$  — коэффициент,  $n = 1..3$ .

Под влиянием осушительной сети одновременно с понижением уровня грунтовых вод возрастает амплитуда его колебаний в пределах осушаемого болота. Она увеличивается за счет более высокого максимума и более низкого минимума уровней грунтовых вод. На прилегающих землях амплитуда уменьшается только за счет меньшего, чем до осушения, отклонения минимума от среднего значения.

#### 33.2. Загрязнение поверхностных вод дренажным стоком

При освоении и использовании мелиорируемых земель вносят повышенные дозы минеральных удобрений и пестицидов, которые выносятся дренажным стоком в водотоки и водоемы. Для разработки

мероприятий по предотвращению загрязнений необходимо знать, с одной стороны, предельно допустимые концентрации загрязняющих веществ, а с другой – иметь возможность прогнозировать концентрации основных загрязняющих веществ. Предельно допустимые концентрации приведены в таблице 21.

Наиболее интенсивно вымываются азотные удобрения. Максимальный вынос азотных удобрений наблюдают с полей, занятых

21. Предельно допустимые концентрации некоторых биогенных веществ в воде

| Компонент                           | Лимитирующий показатель вредности | ПДК, мг/л               |                   |
|-------------------------------------|-----------------------------------|-------------------------|-------------------|
|                                     |                                   | Хозяйственная, питьевая | Рыбохозяйственная |
| Аммиак (по азоту)                   | Санитарный                        | 2                       | 0,05              |
| Аммоний (солевой)                   | Токсикологический                 | 2,6                     | 0,5               |
|                                     | Санитарно-токсикологический       | —                       | 50                |
|                                     | То же                             | —                       | 180               |
|                                     | »                                 | —                       | 40                |
|                                     | »                                 | —                       | 120               |
| Нитраты                             | »                                 | 44                      | 40                |
| Нитриты                             | »                                 | —                       | 0,08              |
| Сульфаты                            | »                                 | 500                     | 100               |
| Хлориды                             | »                                 | 350                     | 300               |
| Железо                              | Органолептический                 | 0,5                     | —                 |
| Сухой остаток (общая минерализация) | »                                 | 1000                    | —                 |
| pH                                  | »                                 | 6,5...8,5               | 6,5...8,5         |

пропашными культурами, полей под паром, а нитратов – при окультуривании торфяных почв.

В зоне орошения значительный вынос азотных удобрений отмечают при нерациональных режимах орошения и промывках засоленных земель.

Основные загрязнители – органические вещества, железо, азот и пестициды, входящие в состав сбросных вод.

Расчеты по выносу загрязняющих веществ проводят на период начала использования мелиорируемых земель для мелиоративного объекта и прилегающей к нему территории в границах площади водосбора для устьевоего створа магистрального канала.

Вынос азота во время вегетационного периода рассчитывают по формуле

$$B_N = \frac{(K_1 N_y + 0,0002 N_o + 0,07 N_n) W_{др}}{W_{пр} + W_{др}} + \omega (K_2 N_y + 0,002 N_o + 0,66 N_n + N_b + [\gamma (K_1 N_y + 0,0002 N_o + 0,07 N_n)]^0, \quad (202)$$

где  $B_N$  — вынос азота дренажным и поверхностным стоком за расчетный период, кг/га ( $\text{NO}_3$  — 1,2...6,1;  $\text{NH}_4$  — 2,6...13 кг/га);  $K_1$  — коэффициент, характеризующий остаточное количество подвижных форм азота минеральных удобрений после фиксации почвой и почвенными микроорганизмами газообразных потерь в атмосферу, выноса с урожаем; зависит от формы азотных удобрений: для аммиачной селитры — 0,02, натриевой и кальциевой селитры — 0,01, сульфата аммония — 0,03, хлористого аммония — 0,06, известково-аммиачной селитры — 0,02 (гранулированной);  $N_y$  — норма внесения удобрений по действующему веществу, кг/га (50...300 кг/га); 0,0002 — коэффициент, характеризующий остаточное количество подвижных форм минерального азота;  $N_o$  — норма внесения органических удобрений, кг/га (10...50 кг/га);  $N_n$  — содержание минерального азота в пахотном слое, кг/га (по данным измерений);  $W_{др}$  — объем дренажного стока 10 %-ной обеспеченности за расчетный период, м<sup>3</sup>/га;  $W_{пр}$  — запас влаги в почве до уровня грунтовых вод на начало расчетного периода, м<sup>3</sup>/га (по данным изысканий);  $\omega$  — коэффициент, характеризующий долю выноса сорбированного азота твердым стоком из объема пахотного слоя почвы,  $\omega = 0,8 \cdot 10^{-5} \dots 0,15 \cdot 10^{-3}$ ;  $K_2$  — коэффициент, характеризующий количество азота, фиксированного почвой и почвенными микроорганизмами из удобрений [для аммиачной селитры — 0,65, сульфата аммония 0,35, натриевой и кальциевой селитры — 0,18, хлористого аммония — 0,04, известково-аммиачной селитры (гранулированной) — 0,65]; 0,002 — коэффициент, характеризующий количество азота, фиксированного почвой и микроорганизмами из органических удобрений; 0,66 — коэффициент, характеризующий количество минеральных форм азота, фиксированного почвой из минерального азота;  $N_B$  — валовое содержание азота в пахотном слое почвы, кг/га (по данным измерений);  $\gamma$  — коэффициент, характеризующий долю выноса растворенного азота поверхностным стоком из объема почвенного раствора пахотного слоя почвы,  $\gamma = 0,7 \cdot 10^{-5} \dots 0,14 \cdot 10^{-3}$ ;  $\sigma$  — коэффициент поверхностного стока.

### Контрольные вопросы и задания

1. Как найти границу влияния мелиоративной системы на прилегающую территорию?
2. Для какой осушительной системы зона влияния будет больше, если тип водно-минерального питания территории атмосферный; грунтовой?
3. Почему следует рассматривать последствия хозяйственной деятельности не только на хозяйственно используемой территории, но и на всей площади водосбора мелиоративной системы?
4. Почему дренажные стоки представляют опасность для водоприемников?
5. Какова наиболее радикальная мера предохранения водоприемника от загрязнения дренажными стоками?

## Глава 9

### ЗАЩИТА ОЗЕР И ВОДОХРАНИЛИЩ ОТ ЭВТРОФИРОВАНИЯ ДРЕНАЖНЫМ СТОКОМ С ОСУШАЕМЫХ ЗЕМЕЛЬ\*

Природные условия и антропогенная деятельность значительно влияют на геохимический круговорот веществ в водных объектах и, как следствие, на их *эвтрофирование*. Эвтрофирование — это процесс интенсификации первичного продуцирования, в результате которого интенсивность создания и объемы фитомассы превышают нормы межгодовых колебаний в неэвтрофированных водоемах. В результате

\* В написании раздела принимала участие Е. С. Левадо.

эвтрофирования нарушается соотношение между отдельными трофическими звеньями и изменяется трофический тип водоема. Таким образом, эвтрофирование – не только переход к гипертрофии водоема и “цветению” воды от бурного размножения синезеленых водорослей, но и переход экосистемы от одного уровня динамического равновесия к другому.

Эвтрофирование может проявиться как в виде отклонений от нормы сезонного цикла продуцирования, так и в нарушениях межгодовых ритмов, а также в перераспределении мест с наивысшей интенсивностью образования фитомассы.

На эвтрофных и гипертрофных стадиях процесс новообразования органического вещества в озерах значительно превышает его использование последующими звеньями трофической цепи. В результате появляется большое количество отмерших растительных остатков и их разложение приводит к дефициту кислорода в воде, а также к возврату биогенных веществ в воду, т. е. идет процесс вторичного загрязнения.

Процесс эвтрофирования зависит как от экологической устойчивости водоема, так и от интенсивности воздействия внешнего фактора – загрязнения водоема.

Загрязнение водоемов происходит либо в результате концентрированного сброса сточных вод, содержащих биогенные вещества, либо в результате диффузного, рассредоточенного поступления загрязнений со всей водосборной площади.

Оценить и ограничить диффузное загрязнение значительно труднее, чем точечное. Типичным случаем диффузного загрязнения является загрязнение грунтовых вод удобрениями и ядохимикатами, а в дальнейшем загрязнение водоемов и озер грунтовыми водами, насыщенными биогенными веществами.

Озера и водохранилища, расположенные в гумидной зоне, – наиболее мощные источники диффузного загрязнения. Часть этой зоны находится в бассейне Балтийского моря, поэтому диффузное загрязнение оказывает влияние не только на эвтрофирование озер и водохранилищ, но в определенной степени и на эвтрофирование моря. При этом даже в местах, отдаленных от промышленных центров, наблюдается эвтрофирование, так как биогенные вещества могут поступать с осадками. За год на один квадратный километр поступает около 5 кг фосфора и 100 г азота.

В промышленных районах эта нагрузка увеличивается соответственно до 40 и 700 кг, т. е. возрастает более чем в семь раз.

#### **34. ОСНОВНЫЕ РАССРЕДОТОЧЕННЫЕ ИСТОЧНИКИ ЭВТРОФИРОВАНИЯ В ГУМИДНОЙ ЗОНЕ**

Формирование гидрохимического режима обусловлено тремя источниками притока и оттока биогенных соединений:

с отдельными составляющими водного баланса; с источниками и



стоками, связанными с внутриводоемными процессами; с трансформацией биологических структур и химических соединений.

Для вновь создаваемых водохранилищ существенным источником поступления биогенных веществ могут оказаться затопленные почвы и растительность, однако эти процессы наиболее интенсивно проходят в первые 3...6 мес и ослабевают через год.

Наиболее мощным источником стока биогенных веществ может явиться вынос их с водосбора. Вынос загрязняющих веществ с водосбора поверхностным и подземным стоком зависит от ряда факторов, основными из которых можно считать следующие: интенсивность разложения органического вещества, содержание биогенных веществ в почве, их растворимость, интенсивность инфильтрации, интенсивность поверхностного стока, эрозионные процессы, время и погодные условия при внесении удобрений, наличие напорного питания подземных вод.

В качестве фонового значения приведем интенсивность поступления биогенных веществ в водоемы с естественных водосборов, покрытых хвойными лесами, кг/км<sup>2</sup> в год: общий фосфор – 0,04, азот органический – около 1, азот общий – 1,4. Обобщенные данные по ряду стран показывают, что вынос общего фосфора для естественных водосборов изменяется от 0,03 до 0,09 кг/км<sup>2</sup> в год, а общего азота – от 0,8 до 1,8 кг/км<sup>2</sup> в год. Для сельскохозяйственных водосборов эти цифры значительно выше и составляют соответственно 15...34 и 200...3000 кг/км<sup>2</sup> в год.

Наибольший вынос биогенных веществ, особенно фосфора, происходит при повышении кислотности почвы из-за переувлажнения или действия кислотных дождей. Существенное влияние на вынос биогенных веществ оказывает распаханность водосбора. Так, при увеличении процента распаханности от 5 до 40 % поступление фосфора увеличивается более чем в два раза (с 10 до 22 кг/км<sup>2</sup> в год). При дальнейшем увеличении распаханности вынос фосфора почти не возрастает.

Вынос азота линейно связан с площадью окультуривания водосбора.

Экологическое состояние водных систем зависит от соотношения фосфора и азота. Для наиболее чистых озер Эстонии, Латвии и Беларуси соотношения содержания в воде общего фосфора и общего азота были 1:30, 1:40 и даже 1:100. При антропогенном воздействии эти соотношения изменяются от 1:15 до 1:25, в гипертрофных озерах – от 1:12 до 1:18. Следовательно, в процессе эвтрофирования происходит изменение соотношения биогенных элементов в водной среде в сторону уменьшения общего азота и увеличения общего фосфора, причем в гипертрофные водоемы фосфор поступает в значительных количествах не только с водосбора, но и из донных отложений.

На интенсивность эвтрофирования озер и водоемов влияет не только долговременное изменение природных условий (сведение

лесов, распаханность), но и кратковременные действия. При вывозе удобрений зимой на поля, покрытые снегом, или весной на мерзлую почву в период весеннего снеготаяния нитратный азот полностью смывается. С талыми водами выносятся до 60 % годового объема фосфора и азота, в том числе 40 % во время пика паводка. Вообще, вынос биогенных веществ прямо пропорционален количеству внесенных минеральных удобрений.

Большое влияние на объем выноса минерального азота в грунтовые воды оказывают вид почвы и ее механический состав и вид сельскохозяйственного использования. Так, вынос минерального азота (кг/га) в грунтовые воды составляет.

В зависимости от вида почвы:

|                     |         |
|---------------------|---------|
| для черноземов      | 24...30 |
| серых лесных почв   | 3...23  |
| дерново-подзолистых | 0...15  |

В зависимости от механического состава почвы:

|                    |         |
|--------------------|---------|
| для песчаных       | 25...50 |
| супесчаных         | 5...16  |
| суглинистых        | 2...8   |
| иловатых суглинков | 2...5   |

В зависимости от сельскохозяйственного использования:

|                                       |       |
|---------------------------------------|-------|
| чистый пар                            | До 21 |
| пропашные культуры<br>(картофель)     | 5...8 |
| культуры сплошного<br>сева (зерновые) | 1...3 |

В целом с поверхностным и подземным стоком с освоенных водосборов выносятся от внесенного количества удобрений до 1 % фосфора в год и до 30 % азота.

Обычные условия поступления биогенных веществ в водоемы возникают при осушении торфяных почв. Изменение водного режима (понижение уровня грунтовых вод) приводит к интенсивному разложению органики, а интенсификация инфильтрации – к большому вымыву биогенных веществ из почвы. При этом наибольшая концентрация веществ (азота, фосфора, калия) наблюдается в верхнем 10-см слое грунтовых вод. Концентрация во времени при отсутствии сосредоточенных загрязняющих воздействий уменьшается по экспоненте.

В последние годы в гумидной зоне для повышения продуктивности сельскохозяйственных угодий на фоне дренажа применяют орошение. Это антропогенное воздействие влияет на вымыв наиболее сильно. На каждые 100 м<sup>3</sup>/га водоподачи концентрация калия в грунтовых водах линейно увеличивается на 0,38 мг/л, аммиака – на 0,04, нитратов – на 0,05 мг/л. Учитывая большие объемы водоподачи, интегральные величины вымывов достигают значительных величин.

В связи с обогащением водотоков биогенными веществами водоемы и озера обильно зарастают микрофитами. Обильными становятся свободноплавающие или погруженные виды (погруженный роголистник, элодея канадская, ряска и др.).

Во многих водоемах и озерах уровень биогенного стока в 5...10 раз превышает возможное потребление растениями. Однако при прекращении поступлений загрязнителей в водоем растения очищают его, накапливая их в растительных тканях. Процесс этот аналогичен изменению концентраций соответствующих веществ в грунтовых водах и описывается убывающей экспонентой. В первые моменты времени (1...2 декады) концентрации нитратного и аммиачного азота могут уменьшаться в 5...7 раз, а дальнейшее уменьшение концентраций происходит очень медленно.

### 35. МЕТОДЫ БОРЬБЫ С ЭВТРОФИРОВАНИЕМ ВОДОЕМОВ В ГУМИДНОЙ ЗОНЕ

Анализируя причины эвтрофирования, которые связаны с источниками загрязнения водотоков, можно наметить ряд методов борьбы с этим явлением.

Основная тенденция в борьбе с эвтрофированием, особенно от неточечных источников, — это усовершенствование управления технологическими процессами в сельском хозяйстве вообще и мелиорации в частности. Современная практика, опирающаяся только на водные мелиорации, приводит к существенному рассогласованию геологического и биологического круговоротов веществ и энергии. Биологический круговорот интенсифицируется так быстро, что видовой состав продуцентов не успевает перестраиваться для того, чтобы полностью использовать увеличивающийся поток биогенов веществ. В связи с этим необходимо уменьшение потока азота и фосфора с водосбора в водные объекты. Уменьшить их приток в водоемы возможно при более точном управлении водным, питательным и тепловым режимами осушаемых земель, т. е. при комплексной мелиорации этих земель.

Комплексная мелиорация включает все виды мелиораций — водные, питательные, тепловые, химические, фитомелиорации, агро-мелиорации, ландшафтные и др. Они могут быть выполнены гидротехническими либо агротехническими способами, но в любом случае комплекс должен приводить к основной цели мелиорации — максимизации перевода биогенных веществ из геологического оборота в биологический.

В МГМИ были разработаны основные принципы экологически безопасного земледелия на осушаемых землях. В первую очередь нельзя допускать излишней сработки органики осушаемых почв. Для этого необходимо точно поддерживать оптимальный водный, тепловой, питательный и газовый режимы почвы, учитывающие не только

требования культурных растений, но и Требования почвенной биоты. Дозированное разложение органики почвы должно привести к балансу двух процессов: появления биогенов из органики – потребления биогенных веществ растениями. Эту концепцию можно реализовать, имея сильное растение с развитой корневой системой. Таким образом, первый принцип: чем выше урожай без внесения минеральных удобрений, тем меньше загрязнение грунтовых вод.

К сожалению, далеко не всегда удается сбалансировать процесс разложения – потребления, и часть производных органики (от 20 до 50 %) неизбежно попадает в грунтовые воды. В этом случае необходимо создать условия для максимального использования биогенов, находящихся в грунтовых водах, что возможно реализовать при сбалансированном водообмене в системе грунтовые воды – зона аэрации. Таким образом, второй принцип: поддержание грунтовых вод на оптимальной глубине.

Учитывая большую инерционность процессов управления грунтовыми водами, не всегда можно создать сбалансированный водообмен, в связи с этим часть биогенных веществ может попасть в грунтовые воды глубже поверхностного 10-см слоя и далее быть вынесенной в открытые каналы. Существующая практика эксплуатации осушительных систем предписывает содержать каналы таким образом, чтобы обеспечить минимальную гидравлическую шероховатость, т. е. убирать из них всю растительность. Однако это не дает возможности сделать их экологически безопасными. Только максимальное связывание биогенных веществ растительностью дает возможность очистить на этом этапе дренажные воды и снизить опасность эвтрофирования водоемов, находящихся ниже по течению.

Таким образом, третий принцип: максимизация использования солнечной энергии водными автотрофами внутри осушительной системы и, как следствие, максимизация связывания биогенных веществ. Растительную массу из каналов удаляют и используют для повышения плодородия почв.

В моменты слабого развития фитомассы в открытых осушительных каналах дренажный сток вместе с биогенами целесообразно улавливать специальным водохранилищем, замыкающим осушительную систему. Из этого водохранилища вода вместе с биогенными веществами может возвращаться на поля. Таким образом, четвертый принцип: создание инженерной водооборотной осушительно-оросительной системы.

### *Контрольные вопросы и задания*

1. Что такое эвтрофирование водоема?
2. Как интенсивность водообмена связана с эвтрофированием?
3. Как ослабить влияние сельскохозяйственного поля на процессы эвтрофирования в близрасположенном водоеме?
4. Какова разница между естественным и антропогенным эвтрофированием?
5. Как рассчитать биогенную нагрузку на водоем при точечном и диффузном загрязнении?
6. Каковы естественные методы предотвращения эвтрофирования водоемов?

## Глава 10

# ОХРАНА ВОДНЫХ РЕСУРСОВ ОТ ЗАГРЯЗНЕНИЯ И ЗАСОРЕНИЯ

### 36. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ПОКАЗАТЕЛИ СОСТОЯНИЯ ВОД

Под охраной вод подразумевают деятельность людей, направленную на сохранение, восстановление и улучшение состояния природных запасов воды на земле с использованием правовых, естественнонаучных, технических, экономических и воспитательных средств.

Под *загрязнением* понимают такое изменение состава и свойств воды под прямым или косвенным влиянием производственной деятельности или бытового использования населением, при котором она становится частично или полностью непригодной для одного из видов водопользования.

Под *засорением* понимают поступление в водоем посторонних нерастворимых предметов, практически не изменяющих качество воды (древесина, шлак, металлолом, строительный мусор и т. д.).

Степень загрязнения водных источников определяется концентрацией в воде вредных примесей и регламентируется требованиями различных отраслей народного хозяйства. Наиболее жесткие требования к воде предъявляют хозяйственно-питьевое и культурно-бытовое водопользование.

Важнейшие показатели состояния вод приведены ниже.

*Предельно допустимая концентрация (ПДК)* вредных веществ в воде – основные гигиенические нормативы, положенные в основу современных нормативных документов. Нормативы ПДК (в мг/л) разработаны для многих веществ, поступающих в водоемы. Например: бензол – 0,5 мг/л, свинец – 0,1, ртуть – 0,005, железо – 0,5, бензин – 0,1 мг/л и т. д. (см. табл. 21).

Сточные воды со степенью загрязнения, приводящей к ПДК в контрольном створе, отводить в водоемы запрещается.

*Биохимическое потребление кислорода (БПК)* указывает на содержание (в мг/л) в воде кислорода, необходимого для скисления находящихся в воде загрязняющих, преимущественно органических веществ.

Для бытовых сточных вод БПК довольно стабильно и зависит от нормы водопотребления на 1 человека.

|   |           |           |           |
|---|-----------|-----------|-----------|
| Норма водопотребления<br>на 1 человека, л/сут | 50        | 100       | 200       |
| БПК, мг/л                                     | 600...800 | 300...400 | 150...200 |

Для промышленных сточных вод БПК зависит от характера производства и колеблется от 60 мг/л до нескольких тысяч.

Содержание в воде растворенного кислорода определяется соотношением потребления его загрязняющими веществами и реэрации – насыщением воды кислородом. Пополнение кислорода в воде происходит в основном за счет соприкосновения воды с атмосферой и зависит от площади поверхности воды, степени насыщенности кислородом поверхностного слоя и интенсивности перемешивания воды. Разность между содержанием кислорода при полном и фактическом насыщении называют дефицитом кислорода, который выражают в мг/л или в процентах от полного насыщения.

*Водородный показатель* рН определяет концентрацию в воде ионов водорода и показывает ее кислотность или щелочность. У водозаборов культурно-бытового водопользования рН не должен превышать 6,5...8 (см. табл. 21). Этой же нормой определяется нормальное самоочищение природных вод.

*Органолептические свойства воды* характеризуют запах, привкус и плавающие примеси, неблагоприятно влияющие на человека. Эти свойства обычно оценивают в баллах. Например, интенсивность запахов можно определить по таблице 22.

22. Шкала интенсивности запахов

| Баллы | Значение      | Признаки   |
|-------|---------------|--|
| 0     | Нет запаха    | Отсутствие ощущения запаха   |
| 1     | Очень слабый  | Запах, не поддающийся обнаружению потребителем, но обнаруживаемый в лаборатории                          |
| 2     | Слабый        | Запах, не привлекающий внимания потребителей, но поддающийся обнаружению, если обратить на него внимание |
| 3     | Заметный      | Запах, легко обнаруживаемый, может сделать воду неприятной для питья                                     |
| 4     | Отчетливый    | Запах, обращающий на себя внимание и делающий воду неприятной для питья                                  |
| 5     | Очень сильный | Запах настолько сильный, что делает воду непригодной для питья   |

У пунктов культурно-бытового водопользования вода не должна иметь запаха интенсивностью более 2 баллов.

Аналогичную шкалу используют и для оценки интенсивности привкусов воды. Обычно вкусовые свойства проявляются при концентрациях, превышающих пороговые по запаху.

Окраска воды не должна обнаруживаться в столбике высотой более 20 см при использовании водоема в качестве источника питьевого водоснабжения и в столбике высотой 10 см – во всех других случаях.

**Возбудители заболеваний.** В последнее десятилетие значительно расширился круг заболеваний, связанный с распространением их

возбудителей водным путем. Сточные воды населенных пунктов, животноводческих хозяйств и ряда производств (боен, биофабрик, кожевенных заводов, шерстомоек и др.) – инфекционные.

В нормативных документах указано, что вода источников централизованного водоснабжения не должна содержать возбудителей заболеваний. Согласно нормативным документам бактериальное загрязнение источников водоснабжения при обычных методах очистки и дезинфекции питьевой воды не должно превышать 1 тыс. кишечных палочек в 1 л. Таким образом, водоемы, используемые для питьевого водоснабжения, при соответствующей очистке и дезинфекции на водопроводных сооружениях обычного типа при коли-индексе 1 тыс. по бактериальным характеристикам считаются достаточно чистыми.

**Взвешенные вещества.** Бытовые и промышленные сточные воды содержат значительное количество взвешенных органических и минеральных веществ, которые могут ухудшить органолептические свойства воды, а иногда и быть вредными для организма. Поэтому при спуске сточных вод содержание взвешенных веществ не должно увеличиваться более чем на 0,25 мг/л в водоемах, используемых для питьевого водоснабжения и водоснабжения пищевых предприятий, и на 0,75 мг/л – для водоемов, используемых для рекреации.

### 37. СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ПРИРОДНЫХ ВОД

В современных условиях хозяйственной деятельности человека антропогенное воздействие на природу стало сильнее естественных процессов в природе. Приобретенная в процессе эволюции замечательная способность природы к саморегулированию в условиях естественной изменчивости среды стала нарушаться. Человек, внося искусственные изменения в природную среду и биогеоценозы, не считаясь с законами природы, лишает их устойчивости, что часто приводит к коренным изменениям в экосистемах, прогрессирующему разрушению биосферы.

В тяжелых условиях оказались такие элементы биосферы, как воздушная и водная среды. Проблема получения чистого воздуха и свежей воды стоит более чем перед 1/3 населения планеты. Качество воды оценивается концентрацией в ней вредных примесей, следовательно, зависит от степени разбавления сточных вод чистой водой. Поэтому в условиях интенсификации отбора воды для нужд быстро развивающегося народного хозяйства даже при современных методах очистки сточных вод загрязнение водоисточников будет продолжаться.

Тенденция в изменении качества воды различных водных объектов неодинакова. Наблюдается как улучшение, так и ухудшение качества воды, или стабилизация его. В последние годы заметно некоторое, пока незначительное, улучшение качества воды в связи с усилением внимания к охране вод. Однако большое количество

малых рек в промышленно развитых районах до сих пор являются коллекторами сточных вод и, по сути дела, потеряны для водопользования населением.

Подвергаются загрязнению и наиболее ценные источники водоснабжения населением питьевой водой – подземные воды. Основными источниками загрязнения подземных вод являются накопители промышленных и бытовых сточных вод, поля фильтрации, свалки промышленных отходов, закачка загрязненных вод в глубокие слои, инфильтрация загрязнений с промышленных и городских территорий, фильтрация из загрязненных рек. Наиболее распространены химическое и бактериальное загрязнение. Проникновению загрязнений в подземные горизонты способствует интенсивное использование подземных вод.

### 38. ОСНОВНЫЕ ИСТОЧНИКИ ЗАГРЯЗНЕНИЯ ПРИРОДНЫХ ВОД

**Промышленные стоки.** Наибольшее загрязнение природных вод дает промышленность таких отраслей народного хозяйства, как нефтедобыча, химическая, мыловаренная, целлюлозобумажная, текстильная, металлургическая, горнодобывающая и др.

Почти все промышленные сточные воды загрязнены в той или иной мере нефтепродуктами, отрицательно влияющими на качество воды. Даже незначительное содержание нефти (0,2...0,4 мг/л) придает воде специфический запах, который не исчезает после хлорирования и фильтрации. Рыба даже при меньших концентрациях нефтепродуктов приобретает привкус и запах, которые не исчезают ни при каких технологических обработках, т. е. рыба становится несъедобной. Увеличенная концентрация нефтепродуктов в воде приводит к массовым заболеваниям и гибели рыбы.

Большую опасность представляют фенольные соединения, находящиеся в сточных водах химических предприятий, особенно лесохимической, анилинокрасочной, коксохимической и других отраслей. Фенольные воды, обладая сильными антисептическими свойствами, нарушают биологические процессы в воде, придавая ей резкий, неприятный запах и ухудшая условия воспроизводства рыбы. Сточные воды предприятий электрохимической промышленности, рудобогадательных фабрик и предприятий по производству пестицидов, а также шахтные и рудничные воды содержат значительное количество цинка и меди, оказывающих неблагоприятные воздействия на водоемы и водотоки.

Появившиеся в последние годы в сточных водах некоторых производств синтетические поверхностно-активные вещества (СПАВ) резко ухудшают биохимическую очистительную способность воды. Поэтому даже при небольших концентрациях СПАВ в воде прекращается рост водной растительности, усиливаются привкусы и запахи, образуются стойкие скопления пены.



**Коммунальные стоки.** Города и другие населенные пункты дают большое количество загрязненных веществ. В составе коммунальных стоков кроме фекальных вод содержится значительное количество вредных соединений от использования химических веществ в быту, а также от предприятий пищевой промышленности, общественного питания, торговли и т. д. Наличие в коммунальных стоках болезнетворных микробов и вирусов, а также яиц гельминтов делает их особенно опасными для здоровья людей. Особенность коммунальных стоков — неравномерность их поступления, затрудняющая работу городской канализации.

Населенные пункты дополнительно загрязняют водные объекты поверхностным стоком от дождей или таяния снега с улиц, дворов и с территорий промышленных предприятий. Они содержат нефтепродукты и другие специфические загрязнения.

**Химизация сельского хозяйства.** Интенсификация сельскохозяйственного производства сопровождается быстрым наращиванием темпов применения минеральных удобрений и химических средств защиты растений от сорняков, вредителей и болезней. В результате в окружающую среду поступает большое количество химических веществ, в том числе пестицидов, многие из которых устойчивы к воздействию внешних факторов и в течение долгого времени сохраняют свои свойства. В результате длительного применения пестициды накапливаются в почве, а затем смываются в водоёмы или просачиваются в водоносные горизонты. При обработке полей с помощью авиации пестициды могут непосредственно попадать в воду.

Особая опасность загрязнения вод удобрениями и пестицидами заключается в том, что стоки с полей (диффузное загрязнение) невозможно пропустить через очистные сооружения. Кроме того, огромные площади сельскохозяйственных угодий являются основными речными водосборами, с которых вода поступает в водные объекты.

Биогенные вещества способствуют интенсивному развитию фитопланктона ("цветению воды"), стимулируют рост нежелательных водных организмов, вызывают прогрессирующее эвтрофирование, приводят к нарушению процессов самоочищения.

Вносимый в почву азот под влиянием нитрификационных процессов превращается в легкорастворимые нитратные формы, обладающие большой подвижностью, что загрязняет грунтовые воды, делая их непригодными для употребления, так как они вредны для здоровья.

Наибольшее загрязнение водоисточников биогенными веществами наблюдается в районах орошаемого земледелия. Например, при применении удобрений на рисовых чеках 14...18% их уходит вместе с коллекторно-сбросными водами.

Орошаемое земледелие дает весьма большие возвратные стоки, которые не только загрязнены удобрениями и пестицидами, но и сильно минерализованы. Впоследствии возвратные стоки с орошаемых

массивов будут сокращаться за счет совершенствования техники полива.

Для защиты сельскохозяйственных культур от вредителей, болезней и сорняков все шире применяют химические средства. Сельское хозяйство является практически единственным загрязнителем водных объектов пестицидами.

В открытые воды пестициды попадают с дождевыми и тальными водами, стекающими с обработанных ими территорий, при нарушении технологии авиа- и наземной обработки сельскохозяйственных угодий и лесов, в результате сброса сточных вод предприятиями, производящими пестициды, неправильного хранения или потерь при транспортировании.

При несоблюдении дозировок и сроков обработки пестициды накапливаются в сельхозпродуктах, идущих в пищу людям и на корм скоту. Увеличение кратности обработок ведет к накоплению пестицидов в почве и последующему вымыванию их в водоемы. С 1 тыс. га отдельных оросительных систем ежегодно выносятся около 100 кг пестицидов, наиболее стойких и обладающих кумулятивными свойствами. Накапливаясь в тканях и органах рыб, они вызывают их токсокоз и гибель.

Обработка рисовых полей пестицидами сопровождается частичным выносом их со сбросными водами в водотоки и водоемы. Радикальной мерой в этом случае может стать оборотное использование воды, которое позволит расширить площади орошения или сократить потребление воды при сохранении площадей орошения.

**Стоки животноводческих хозяйств.** Многочисленные животноводческие фермы, а в последние годы и крупные животноводческие комплексы для промышленного производства свинины, говядины и молока на 50...100 тыс. голов являются весьма существенным источником загрязнения.

Для облегчения водопоя фермы обычно располагают по берегам водоемов или вблизи от них. При отсутствии жижесборников и навозохранилищ их отходы легко смываются ливневыми стоками или спускаются в водоприемники. От фермы крупного рогатого скота ежедневно образуется 1 т навозной жижи от каждой сотни голов. На небольших реках ниже ферм при отсутствии природоохранных мероприятий вода становится мутной и приобретает неприятные запахи, рыба погибает. В таком положении в свое время оказались реки Медынь в Калужской области, Нара, Увель – в Тамбовской и многие другие. Отходы животноводческих хозяйств опасны тем, что в них содержатся яйца гельминтов (глистов) и патогенные микроорганизмы, являющиеся источником заболеваний. Особенно опасны отходы свиноводческих комплексов. Одна свиноферма на 100 тыс. голов по результатам загрязнения равнозначна городу с населением 250 тыс.

Сложность проблемы охраны вод от стоков животноводческих хозяйств заключается в трудности утилизации отходов.

**Продукты распада синезеленых водорослей.** Синезеленые водоросли относятся к группе низших наиболее примитивных растений. В большинстве случаев это одноклеточные организмы, обычно соединяющиеся в колонии. У некоторых клетки при помощи слизи и выростов соединены в ценобии в виде нитей, давая внешнюю картину многоклеточности. Размножаются преимущественно путем деления клеток. Живут синезеленые водоросли не только в воде, но и на суше (на берегах водоемов, в почвах и на их поверхности). Это самые распространённые растения земного шара. Они первыми заселяют бесструктурные почвы и совместно с бактериями готовят их для освоения другими растениями. Эти водоросли способны к синтезу углеводов, но используют и распадающиеся органические вещества.

В сезоны массового размножения вода кажется окрашенной в зеленый, синий и другие цвета; это явление называется "цветением воды". "Синяя жидкость" образуется при распаде синезеленых водорослей в результате выхода из клеток водорастворимых пигментов. При избыточном развитии водорослей, сопровождающемся "цветением воды", качество воды резко ухудшается. В результате активно протекающих процессов брожения и гниения вода насыщается токсическими продуктами (фенолами, цианидами, высшими спиртами), обедняется кислородом, приобретает неприятные запахи. Это приводит к заболеванию и гибели рыб и других гидробионтов. Вода становится непригодной для питья и рекреации. Биологическое загрязнение воды отмирающими водорослями сопоставимо по вредности с загрязнением сточными водами промышленности.

Масштабы развития синезеленых водорослей настолько возросли, что это стало настоящим бедствием. Массовое развитие их наносит значительный ущерб народному хозяйству вследствие нарушения режима водоснабжения городов и населенных пунктов, возникновения заморов рыбы, загрязнения мест отдыха трудящихся и т. д.

Синезеленые водоросли наиболее интенсивно развиваются в застойных водоемах, расположенных в теплом климате.

В водохранилищах озерного типа со значительной изрезанностью береговой линии и большим числом заливов возрастает доля внутриводоемных процессов, характерных для застойных зон, усиливаются процессы эвтрофирования, и особенно сильно под влиянием поступления в водоемы удобрений с полей и сточных вод.

Если в начальный период эвтрофирование способствует увеличению продуктивности водоема – развитию фитопланктона и рыбы, то в последующем оно является причиной ухудшения качества воды и обеднения видового состава зоопланктона, зообентоса и рыб, приводит к развитию синезеленых водорослей, менее требовательных к условиям обитания. Синезеленые водоросли при малой и средней интенсивности их развития (до 10...20 г/м<sup>3</sup> сухого вещества), как и другие фотосинтезирующие организмы, оказывают положительное влияние, обогащая воду свободным кислородом. Однако в водохра-

нилищах интенсивность их развития велика (до 300...500 г/м<sup>3</sup> и более). В "пятнах цветения", где биомасса синезеленых водорослей достигает 5...10 кг/м<sup>3</sup>, содержание аммонийного азота, минерального азота и минерального фосфора повышается в 5...10 раз, органического азота — в 30...150 раз, численность бактерий возрастает в 25...100 раз, а гнилостных бактерий — до 400 раз. В результате экранирующего действия "пятен цветения" (затенения) подавляются процессы фотосинтеза в толще воды, что сопровождается гибелью кормовых животных и замором рыб. При этом гибнет в основном молодь хищных рыб (судак, окунь, ерш).

Ущерб от цветения воды значительны. Особенно отчетливо они проявляются в системах коммунального и технического водоснабжения, включая ТЭС, и в рыбном хозяйстве.

В системах водоснабжения ущерб связан прежде всего с увеличением расходования коагулянтов и с расширением площади отстойников.

На тепловых электростанциях синезеленые водоросли снижают эффект охлаждения, что приводит к перерасходу топлива.

Избыточное "цветение" ограничивает, а иногда и исключает использование водных ресурсов для рекреации, лечения, спорта и туризма.

**Тепловое загрязнение.** Современные тепловые и атомные электростанции используют для охлаждения огромное количество воды — до 100...200 м<sup>3</sup>/с, которая возвращается в водоемы в подогретом виде, что изменяет их тепловой баланс. В результате повышения температуры воды усиливается ее испарение и увеличивается минерализация.

Более интенсивный рост водной растительности приводит к накоплению органического вещества, а его последующее разложение — к дальнейшей минерализации и уменьшению растворенного кислорода. Все это отрицательно сказывается на растительности и живых организмах.

**Молевой сплав леса.** При сплаве бревен россыпью с них при ударах о берега, камни и соударениях между собой сдирается кора, ломаются сучья, которые оседают на дно рек, тонет до 10 % деловых стволов. Затонувшая древесина, а также выделяющиеся из нее смолы, дубильные вещества и другие вредные соединения, медленно разлагаясь, поглощают кислород и выделяют фенольные и другие вредные вещества, отравляя воду. Вырубка густого кустарника по берегам рек, мешающего лесосплаву, усиливает эрозионные процессы, ускоряя заиливание русла.

Особенно большой ущерб молевой сплав наносит рыбному хозяйству. При движении бревен рыба травмируется, разрушаются нерестилища, а под влиянием отравления гибнут икра и кормовые организмы.

Рубки леса на территории водосборов нарушают температурный и

биологический режимы рек. Они мелеют, пересыхают и выпадают из фонда рыбохозяйственных угодий. Тут не последнюю роль сыграло захламление русл топляком. Последствия лесосплава сказываются даже через многие годы после его прекращения.

В последние годы активно проводятся в жизнь меры по сокращению молевого сплава древесины. Так, он полностью прекращен на реках, впадающих в оз. Байкал, исключен на 33 реках Карелии. Очистка рек от затонувшей древесины очень трудна. Ощущается недостаток соответствующей оснастки и механизмов.

**Отходы водного транспорта.** Водный транспорт загрязняет воду вследствие прямого сброса в нее всех отходов, и особенно подсланевых вод, сильно загрязненных нефтепродуктами. Огромное количество нефти попадает в воду при ее перевозках морским транспортом. При холостом рейсе танкеры для устойчивости наполняют водой, в месте загрузки балластную воду, сильно насыщенную нефтепродуктами, сбрасывают за борт. Несмотря на существующее с 1969 г. международное соглашение, запрещающее сброс в море неочищенной балластной воды, многие судовладельческие компании считают более выгодным платить штрафы, чем терпеть убытки от простоя на станциях промывки.

Одна тонна нефти образует на поверхности воды пленку площадью 12 км<sup>2</sup>, затрудняющую поступление в воду кислорода. Это приводит к массовой гибели рыбы и водоплавающей птицы. Опасность для флоры и фауны могут представлять не только сама нефть, но и поверхностно-активные вещества, которые используют для борьбы с нефтью. Большой ущерб разлившаяся нефть приносит курортным побережьям многих стран.

**Радиоактивные отходы.** Появившиеся в последние десятилетия радиоактивные отходы некоторых производств представляют большую опасность для природных вод. Мелкие организмы, содержащие эти вещества в небольших дозах, поглощаются более крупными, в которых возникают уже опасные концентрации. Поэтому растения и рыбы в несколько тысяч раз радиоактивнее водной среды, в которой они обитают.

Сточные воды с повышенной радиоактивностью сливают в специальные подземные резервуары или закачивают в глубокие бессточные подземные бассейны. Используется также обезвреживание стоков и дальнейшее захоронение "блоков" в контролируемых местах.

**Загрязнение атмосферы.** Современная индустрия ежегодно выбрасывает в атмосферу Земли более 53 млн т окислов азота, 200 – окиси углерода, около 146 – двуокиси серы, 200...250 – пыли и 120 млн т золы.

Твердые частицы этих выбросов перемещаются воздушными потоками на большие расстояния и выпадают на поверхность суши или воды. Газообразные выбросы также переносятся воздухом и, растворяясь в атмосферной влаге, выпадают на поверхность земли в виде

”кислотных дождей”, наносящих большой ущерб флоре и фауне. От ”кислотных дождей” и других атмосферных загрязнений особенно страдают страны Скандинавии и Канада, куда переносятся воздушные массы из европейских стран и США. Загрязнение природы через атмосферу носит глобальный характер. Кроме водных объектов от ”кислотных дождей” гибнут леса. Особенно это проявляется в ФРГ, Швеции, а также в Канаде.

### **39. МЕРОПРИЯТИЯ ПО ОХРАНЕ И ВОССТАНОВЛЕНИЮ ЧИСТОТЫ ВОДОЕМОВ**

При отсутствии надлежащих мер по снижению в сточных водах загрязняющих веществ их разбавление в естественных водоемах становится недостаточным. Большие концентрации вредных примесей препятствуют самоочищению воды, и ее загрязнение быстро прогрессирует.

Поэтому для сохранения чистоты водоемов необходимо обеспечить полную очистку коммунально-бытовых и промышленных стоков, совершенствовать и изменять технологию промышленного производства, разрабатывать и внедрять маловодную и безводную технологии, широко внедрять оборотное водоснабжение, расширять повторное использование очищенных сточных вод в целях сокращения сброса в водоемы, применять рациональные способы и приемы использования удобрений и пестицидов, разрабатывать и осуществлять государственные планы водоохраных мероприятий в масштабах бассейнов рек и водоемов с учетом перспективного размещения производственных сил.

#### **39.1. Способы очистки промышленных и коммунальных стоков**

Способы очистки сточных вод подразделяются на механические, физико-химические, химические и биохимические.

*Механическую очистку* проводят для отделения нерастворенных веществ процеживанием, отстаиванием, фильтрованием и центрифугированием.

Применяют ее как предварительную перед другими способами очистки при использовании сточных вод для целей производства. При допустимых показателях качества эти воды выпускают в водоем. Воды, прошедшие механическую очистку, как правило, обеззараживают хлорированием.

*Химические и физико-химические способы* применяют для очистки производственных сточных вод от коллоидных и растворенных загрязняющих веществ. Для этого в соответствии с характером загрязнения в воду вводят специальные реагенты, пропускают воздух или пар, используют электролиз и ионообменные материалы.

*Биохимическая очистка* основана на способности некоторых микроорганизмов использовать для своего развития органические вещества, содержащиеся в сточных водах в коллоидном и растворенном состоянии. Этот способ применяют после того, как сточная вода очищена от минеральных и нерастворимых органических веществ. Он позволяет почти полностью удалить загрязнения органического происхождения. Биохимическую очистку осуществляют в естественных условиях – на полях орошения, полях фильтрации или биологических прудах, а также в искусственных условиях – в биологических фильтрах и аэротенках.

### 39.2. Охрана вод от загрязнения удобрениями и пестицидами

Загрязнение водоемов не является неизбежным спутником интенсификации сельскохозяйственного производства. Более того, правильное использование органических удобрений – эффективное средство защиты окружающей среды, так как их применение улучшает структуру почвы, повышает ее устойчивость к водной и ветровой эрозии.

Для предупреждения попадания удобрений в водоисточники необходимо:

- соблюдение соответствия норм внесения удобрений потребностям растений, установление оптимальных сроков внесения удобрений с учетом биохимических превращений в почве, частое внесение удобрений в период вегетации (особенно для почв легкого механического состава);

- внесение удобрений с оросительной водой (внесение азотных удобрений с водой при дождевании позволяет снизить их дозу вдвое);

- применение концентрированных форм удобрений, уменьшающих внесение в почву балластных веществ;

- использование медленно действующих удобрений в виде гранул с защитной оболочкой или труднорастворимых удобрений типа конденсатов мочевины, отдающих питательные вещества в почву постепенно, устойчивых к вымыванию и имеющих высокий коэффициент полезного действия;

- применение ингибиторов нитрификации, снижающих активность почвенных бактерий, переводящих аммонийный азот в легкорастворимую нитратную форму;

- исключение способа хранения удобрений под открытым небом.

Для ограничения поступления пестицидов в водные объекты необходимо:

- совершенствовать системы их применения. Прежде всего усилия должны быть направлены на сокращение применения стойких препаратов: использовать пестициды только при сильной зараженности посевов вредителями;

применять для уменьшения рассеивания пестицидов в окружающей среде очаговую, ленточную или краевую обработку вместо сплошной. Расход пестицидов в этом случае снижается в несколько раз при том же эффекте, так как сохраняются естественные враги вредителей (энтомофаги и др.);

применять шире биологические методы защиты растений вместо пестицидов;

разрабатывать менее опасные виды пестицидов, отличающиеся минимальной токсичностью, высокой скоростью разложения в воде и минимально возможной миграционной способностью. Последнему требованию отвечают гранулированные формы пестицидов;

запрещать химическую обработку орошаемых земель с воздуха (авиаопыление). Основным способом применения пестицидов должно стать ультрамалообъемное опрыскивание.

Общими мерами по предотвращению попаданий удобрений и пестицидов в открытые водоемы являются создание прибрежных водоохраных зон с проведением лесных и гидротехнических мелиораций, а также агротехнических мероприятий.

*Лесные мелиорации* заключаются в создании защитных полос в пределах верхней и средней частей речных бассейнов, в результате чего уменьшается поверхностный сток и ослабляются процессы водной эрозии. Число и вид лесных полос зависят от климатических, топографических, гидрологических и гидрогеологических условий.

*Агротехнические мелиорации* предполагают соблюдение правильного ведения сельскохозяйственных работ. Так, на участках, подверженных эрозии, вспашку проводят поперек склонов с последующим выращиванием растений, обладающих достаточно развитой корневой системой. В прибрежной водоохранной зоне склоны должны быть изъяты из сельскохозяйственного использования и залужены. Выпас скота на крутых склонах запрещен.

*Гидротехнические мелиорации* заключаются в основном в поддержании благоприятного водно-воздушного режима почвогрунтов, препятствующего вымыванию питательных веществ из почвы. При орошении нужно не допускать больших поливных норм, приводящих или к смыву удобрений, или к подъему грунтовых вод и засолению.

К мелиоративным мероприятиям относятся также работы по предотвращению образования оврагов, оползней и обрушений берегов. Для этого на крутых склонах устраивают террасы, крепят откосы и прокладывают специальные дренажи и каналы.

Организованное проведение комплексных мелиоративных мероприятий существенно снижает загрязнение природных вод.

### 39.3. Использование стоков животноводческих комплексов

Борьба с губительным действием животноводческих стоков на водные объекты долгое время считалась трудной из-за большого их



количества, сложности утилизации и вывоза, невозможности обеспечения требуемого санитарного состояния навозохранилищ и жи- жесборников. Для большинства небольших и неспециализированных животноводческих хозяйств эта проблема и сейчас не решена, так как необходимы значительные площади под отстойники-навозонакопители и резервуары, сложно обеспечить сооружения надежной инфильтрационной защитой и средствами для погрузки и вывозки на поля твердой фракции отстойников, влажность которой остается выше 80 %.

Более экономичен механический способ разделения стоков на твердую и жидкую фракции с использованием центрифуг. При этом способе ускоряется процесс осветления стоков, уменьшаются площади навозохранилищ и затраты на их строительство. Влажность твердой фракции снижается до 65...70 %.

При такой технологии через центрифуги за сутки пропускают 800...1000 м<sup>3</sup> жидкого навоза; твердую часть превращают в компост и вывозят на поля.

#### 39.4. Защита вод от загрязнения синезелеными водорослями

Массовое развитие синезеленых водорослей в водохранилищах можно остановить путем:

уменьшения притока дополнительных биогенных ресурсов в водохранилище, ликвидации почвенных смывов и сточных вод;

изъятия водорослей с последующим использованием их в хозяйственных целях;

локальным в первую очередь в очагах заражения водохранилищ, удалением иловых отложений, аккумулирующих значительные запасы биогенных элементов и органических веществ, использованием их в качестве органических удобрений для улучшения структуры почвы;

дополнительной аэрацией придонных слоев воды.

Эти мероприятия не только улучшают качество воды, но и позволяют получать прекрасные органические удобрения и дополнительное сырье в виде разнообразной по составу растительной массы (синезеленые водоросли богаты ценными биохимическими компонентами) для промышленности и сельского хозяйства.

Внесение в почву синезеленых водорослей по своему действию равнозначно навозу, а зачастую и превосходит его. Наиболее дешево использование массы водорослей в виде пульпы без отделения от воды. Если пульпу подать на поля непосредственно невозможно, ее собирают в отстойники на песчаных участках, где она кольматирует почву и последняя постепенно покрывается растениями, которые предотвращают ветровую эрозию.

Как техническое сырье синезеленые водоросли используют для бродильной промышленности. При этом выход полезных продуктов брожения на 1 кг воздушно-сухого вещества составляет (г): этилового спирта 25...120, бутилового спирта 200...500, ацетона 6...40.

Синезеленые водоросли используют для кормовых целей, а также в качестве сырья для получения аминокислот. После специальной обработки (высушивание, кипячение, промывание) синезеленые водоросли способны наполовину заменить кормовой белок в рационе птицы, одновременно обогащая его витаминами и микроэлементами.

Перспективно использование синезеленых водорослей для приготовления полезных и дорогостоящих химических препаратов (герианола, различных антибиотиков, феродоксина, нуклеиновых кислот, ряда ферментов, а также хлорофилла) в фармацевтической и парфюмерной отраслях промышленности.

### 39.5. Меры, предупреждающие ухудшение качества вод другими источниками загрязнений

Термическое загрязнение вод атомными и тепловыми электростанциями можно уменьшить, отказавшись от использования естественных водоисточников для охлаждения агрегатов и создавая собственные пруды-охладители, брызгальные бассейны или мощные градирни в виде высоких башен, в которых вода охлаждается распылением. В районах с прохладным климатом пруды-охладители целесообразно использовать для разведения рыбы. Увеличения продолжительности вегетационного периода за счет подогрева воды дает существенную прибавку рыбной продукции, а растительноядные рыбы предотвращают эвтрофирование водоема.

Водный транспорт почти не загрязняет воду, если бытовые отходы аккумулируются на судах, а затем сдаются на специальные береговые или плавучие приемные пункты для переработки. Такие пункты созданы у нас как в речных пароходствах, так и в морских портах. Для исключения загрязнения морских вод нефтепродуктами строят экологически чистые танкеры с двойным корпусом. Зазор между двумя корпусами, равный 2 м, при холостом ходе заполняют балластной водой, не соприкасающейся с нефтью. При повреждении внешней оболочки нефть из внутренней емкости в море не попадает. Вместо балластной воды судно может транспортировать чистую воду.

Установки газо-, золо-, пылеуловителей и различные устройства для улавливания и использования отходов производства предохраняют открытые водоисточники от загрязнения через атмосферу, но они сложны и требуют дальнейшей разработки.

Следует иметь в виду, что даже самые совершенные методы очистки сточных вод могут лишь отдалить загрязнение природных вод, но не остановить, так как в экономически развитых районах используют все водные ресурсы и, несмотря на соблюдение норм очистки, они загрязняются.

Проблема чистой воды может быть решена только переходом на замкнутые системы водоснабжения, в которых очистные сооружения предназначены не для подготовки вод к выпуску в естественные водотоки, а для многократного использования в производстве.

### 39.6. Самоочищение природных вод и его интенсификация

Способность воды к самоочищению – одно из ее важных свойств. Процессы самоочищения происходят под влиянием солнечной радиации, деятельности микроорганизмов, водной растительности и других факторов. Наиболее интенсивно они протекают летом.

Самоочищение может происходить лишь при многократном (1:7... 1:12) разбавлении загрязненных вод чистой водой.

Самоочищение вод замкнутых водоемов, а также подземных вод происходит медленно. Так, полное самоочищение воды Мирового океана произойдет только через 2600 лет, а подземных вод – через 5000 лет.

Главным фактором процессов самоочищения является кислородное насыщение воды. Растворенный кислород окисляет органические вещества, которые выпадают на дно водоемов в виде минерального осадка.

Вода насыщается преимущественно атмосферным кислородом. Наиболее интенсивно этот процесс идет на реках с быстрым течением и в водоемах при сильных ветровых волнениях. Способствует ему и жизнедеятельность водных растений, выделяющих кислород при фотолитизе воды (фотосинтезе).

Водные растения улучшают качество воды, поглощая из нее растворенные вещества, поэтому они являются важным компонентом процесса биологической очистки сточных вод.

Наиболее благоприятно на качество воды действуют следующие растения:

тростник обыкновенный – крупное многолетнее и неприхотливое, широко распространенное растение. Растет тростник в затопляемых поймах, по берегам прудов, озер, рек, искусственных водохранилищ, даже если корни скрыты двухметровым слоем воды. Особенно мощны заросли его в поймах и дельтах южных рек: Днепра, Дуная, Днестра, Дона, Кубани, Волги, Амударьи, Сырдарьи, Куры, Аракса, Урала. Тростник растет в воде соленых лиманов, по берегам морей, вблизи серных источников, в сильно загрязненных промышленными стоками водоемах, на полях фильтрации и шлакоотстойниках целлюлозно-бумажной и других отраслей промышленности.

При этом качество воды заметно улучшается, так как длинные трубчатые побеги и толстые корневища (до 5...6 см) имеют большие воздушные полости, которые являются своеобразными легкими растения и почвы. Именно поэтому тростник приспосабливается к крайне неблагоприятному газовому составу болотных почв, в которых почти нет кислорода, но содержится до 70 % метана, около 10 двуокиси углерода, 2 сероводорода, 17 азота и 1 % водорода. Благодаря тростнику водно-почвенная среда непрерывно обогащается кислородом, в ней идут процессы окисления. На трех-пяти нижних узлах побега,

покрытых водой, развивается густая мочковатая сеть дополнительных водно-воздушных корней. С их помощью задерживаются находящиеся в воде всевозможные мелкие частицы, в том числе мелкие растительные и животные волокна, жировые и нефтяные эмульсии, хлопья коллоидов и пр. Кроме того, эти корни извлекают из воды различные, растворенные в ней питательные для тростника, но балластные и даже токсичные для водоемов и рек вещества и соли. Один гектар тростниковых зарослей извлекает за сезон из воды и почвы до 5...6 т различных солей, присутствующих в сточных водах.

Опыты показали, что многие токсичные вещества (аммиак, фенол, азотнокислый свинец, азотнокислая ртуть, сернокислая медь, кобальт хлористый, азотнокислый хром и некоторые другие) даже в достаточно высоких дозах не оказывают на тростник вредного влияния.

Заросли тростника, затеняя поверхность водоема, понижая температуру воды, а также поглощая биогенные вещества, сильно задерживают развитие синезеленых водорослей.

Прибрежные заросли тростника гасят волну и защищают берега от разрушительного прибоя, не дают воде замутиться, предохраняют от уноса в водохранилище плодородные земли (например, на незащищенных берегах водохранилищ Днепровского каскада уже потеряно около 7 тыс. га плодородных земель).

Заросли тростника – прекрасная среда обитания многих промысловых пушных зверей, диких животных, водоплавающих птиц, хорошее место нереста и нагула ценных промысловых рыб.

Для эффективного роста необходимо ежегодно выкашивать заросли тростника, не повреждая корни;

*камыш и розоз*, как и тростник, относятся к гидрофитам – растениям, погруженным в воду только нижней частью, и обладают теми же положительными свойствами, но в несколько меньшей степени;

*роголистник и рдест* являются гидафитами – растениями, полностью или большей частью погруженными в воду.

Роголистник – это многолетняя плавающая в толще воды трава без корней. Стебли членистые длиной 30...100 см тонкие и ломкие. В верхней части стебли сильно ветвятся. Листья мутовчатые, без прилистников, вильчато рассеченные на нитевидные сегменты длиной 1,5...2 см. Это растение – эффективный помощник в борьбе с синезелеными водорослями и их цветением;

Рдест пронзеннолистный – один из многих видов семейства дрестовых – многолетнее корневищное растение, погруженное в воду. Цветки, собранные в колосья, возвышаются над водой, колос густой, до 3 см длины, на коротком цветоносе;

*ряска* – распространенное плавающее на поверхности воды растение, иногда полностью покрывающее водное зеркало небольших водоемов. Ошибочно это явление называют цветением воды, считая его вредным. Между тем ряска энергично поглощает углекислоту, обильно выделяет кислород и очищает воду от многих вредных

веществ. Часто в стоячих водоемах жизнь животных и растений возможна только благодаря рыске.

Большое значение в очищении вод, особенно от фенольных соединений, имеют харовые водоросли (хара, нителла, томпелла и др.), обитающие на глубине. Это споровые растения, похожие на хвощи.

Высокую очищающую способность водных растений успешно используют на многих промышленных предприятиях для очистки сточных вод, создавая специальные бассейны с посадками тростника и другой болотной и приболотной растительности.

Следует сказать также о чистильщиках морей. Реки в конечном итоге выносят огромные массы загрязнений в море и океан. Однако вода морей остается прозрачной и достаточно чистой, так как в ней действует огромная армия чистильщиков. Это и водная растительность, и многочисленные ракообразные моллюски, черви. Расположенные на одном квадратном метре организмы при плотном поселении фильтруют за сутки более 200 м<sup>3</sup> воды, освобождая ее от многих загрязнений.

### 39.7. Искусственная аэрация как эффективный способ интенсификации самоочищения воды

Процессы самоочищения резко сокращаются при дефиците в воде растворенного кислорода. Тогда возникает необходимость искусственной аэрации, которую осуществляют специальными аэраторами, пропуская воду через водосливные плотины и вводя воздух в отсасывающие трубы работающих гидротурбин. При любом способе аэрации требуется затрата или потеря энергии, поэтому эффективность искусственной аэрации оценивается приростом содержания кислорода на 1 кВт · ч затраченной энергии.

*Барботажный аэратор* — это горизонтальная труба, расположенная на глубине до 1 м, с присоединенными к ней дугowymi пластмассовыми патрубками с отверстиями (1080 штук на 1 м) диаметром 1,5 мм. Нагнетаемый в трубу через отверстия патрубков воздух при движении к поверхности отдает часть кислорода воде. Эффективность барботажных аэраторов невысока и составляет около 1 кг кислорода на 1 кВт · ч электроэнергии. Кислород воздуха используется всего на 2,2 %.

*Механический аэратор* представляет собой систему электрических аэраторов, располагаемых на понтонах, с вертикальными трубами, заглубленными под уровень воды до 1 м. Испытания показали, что его эффективность составляет 1,14 кг кислорода на 1 кВт · ч.

Применяют также *механические поверхностные аэраторы*, разбрызгивающие воду в воздушном пространстве. Достаточно высокую эффективность дает слив воды через плотину. При этом сооружение должно быть типа водослива со свободнопадающей струей, а сопряжение бьефов — по типу затопленного прыжка.

Так, на плотине Слабада (Литва) при высоте падения 1,19 м и

удельном расходе 150 л/с эффективность аэрации составила 1,48 кг кислорода на 1 кВт · ч электроэнергии.

На водосливе плотины р. Яузы (Москва) высотой 4 м с удельным расходом 250 л/с прирост содержания кислорода в летние дни доходил до 5 мг/л, чему соответствует эффективность аэрации 0,57 кг кислорода на 1 кВт · ч затраченной энергии. Исследования показали, что с увеличением высоты плотины насыщение воды кислородом растет, а эффективность аэрации в расчете на единицу высоты плотины (или на 1кВт · ч) падает. Поэтому искусственная аэрация целесообразна посредством устройства низких водосливных плотин высотой до 1 м.

Наиболее эффективный способ искусственной аэрации – запуск воздуха в зону разрежения отсасывающих труб гидротурбин. На пропеллерной турбине ГЭС Круоста (Литва) рост концентрации растворенного кислорода в воде составил 0,55...1,7 мг/л, а потери мощности турбин за счет снижения расхода воды – 4,8...8,7%. Средняя эффективность искусственной аэрации оказалась 2,58 кг кислорода на 1 кВт · ч, а использование кислорода воздуха достигло 22%.

### *Контрольные вопросы и задания*

1. Назовите естественные и антропогенные факторы, определяющие состояние водных экосистем.
2. Каковы структурные и функциональные показатели состояния водных экосистем?
3. По каким гидротехническим показателям оценивают загрязненность водоема?
4. Какую информацию о состоянии водной экосистемы можно почерпнуть, изучив кислородный режим водоема?
5. Приведите классификацию источников загрязнения природных вод.
6. Чем отличается воздействие промышленных и коммунально-бытовых стоков на водоем?
7. Какова реакция гидробиоценозов на поступление со сточными водами продуктов разложения минеральных удобрений и пестицидов?
8. Что такое самоочищение? Какие показатели водной экосистемы характеризуют ее способность к самоочищению?
9. Какие факторы приводят к развитию в водоеме синезеленых водорослей?
10. Каковы способы предотвращения токсикации и эвтрофирования водоемов?
11. Объясните роль процессов продукции и деструкции в самоочищении воды.
12. Почему с точки зрения охраны природы следует располагать место водозабора ниже по течению места сброса использованных вод?

## **Глава 11**

### **ОХРАНА ВОД ОТ ИСТОЩЕНИЯ**

#### **40. ФАКТОРЫ, ВЛИЯЮЩИЕ НА ВОДНОСТЬ ИСТОЧНИКА**

Главное отличие водных ресурсов от других природных ресурсов – возобновляемость в процессе круговорота воды. Обмен водных масс в гидросфере, как было показано выше, происходит с разной интенсивностью. Практически неизменными остаются воды в ледниках

и глубоко под землей. В реках же вода обновляется до 30 раз в год, что является большим благом для человечества, поскольку единовременный запас воды в реках всего мира может обеспечить нужды всего человечества. По подсчетам М. И. Львовича, лишь в течение полугода и благодаря возобновляемости реки остаются основными источниками воды.

Поверхностная и подземная составляющие речного стока обладают разной хозяйственной ценностью. Подземная часть, как правило, устойчива, постоянно обеспечивает потребности людей в воде и не нуждается в искусственном регулировании. Поверхностный сток образует в реках паводки, он неустойчив, поэтому должен быть искусственно зарегулирован для возможности его постоянного использования. Поэтому наибольшей хозяйственной ценностью обладает подземная составляющая речного стока.

Установлено, что подземная составляющая речного стока тем больше, чем больше осадки и чем меньше поверхностная составляющая речного стока, испарение и транспирация. Поэтому водность источников можно увеличить, изменив указанные составляющие.

Основными факторами, от которых зависит водность рек, следует считать процессы, уменьшающие поверхностный сток и испарение, а также увеличивающие осадки. Транспирация необходима для увеличения растительной массы и поэтому является одной из высших форм использования воды в природе. Ниже рассмотрены причины истощения водных ресурсов с этой точки зрения.

#### 41. ПРИЧИНЫ ИСТОЩЕНИЯ ВОДНЫХ РЕСУРСОВ

Осадки выпадают на поверхность земли, а потом либо просачиваются в почву, либо стекают по ее поверхности. В первом случае они образуют подземный сток, во втором — поверхностный. Распределение стока по составляющим зависит от типа почвы, ее инфильтрующей и водоудерживающей способностей. При очень малых инфильтрационной и водоудерживающей способностях почвы основная масса осадков расходуется на поверхностный сток, поэтому в периоды между паводками реки могут пересохнуть, так как получают скудное питание за счет подземных вод. При больших значениях инфильтрующей и водоудерживающей способностей почвы поверхностный сток уменьшается (рис. 72).

Питание рек достигает максимума при оптимальном сочетании инфильтрующей и водоудерживающей способностей почвы, на которую выпадают осадки. Такое оптимальное сочетание наиболее часто встречается в лесах и на болотах. Под покровом деревьев накапливается больше снега, который тает не сразу, а постепенно. Талая вода задерживается на почве, покрытой лесной подстилкой, и постепенно впитывается. То же самое происходит с дождевой водой. Вместе с тем водоудерживающая способность лесных почв имеет определенный

предел, поэтому значительная часть воды, поглощенная лесной почвой, расходуется на питание подземных вод. Именно в этом и заключается основное водоохранное свойство леса (см. рис. 72). Подземный сток в лесу больше (в 2,5 раза), чем в поле. Таким образом, увеличивая подземную часть стока за счет уменьшения поверхностной, лес является регулятором стока, перераспределяющим его во времени.

Общая водорегулирующая способность лесов на территории бывшего СССР эквивалентна водохранилищу с полезной вместимостью около 200 км<sup>3</sup> при общем полезном объеме водохранилищ около 444 км<sup>3</sup>.

Такими же свойствами обладают и некоторые болотистые почвы.

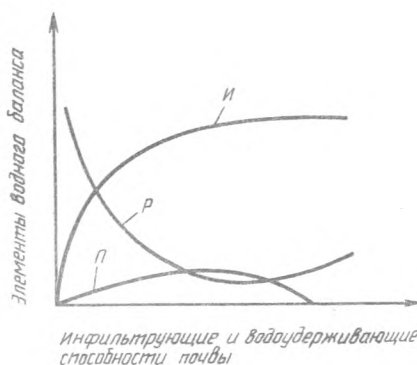
Питание рек почвенными водами зависит также от их дренирующего действия, а количество испаряющейся влаги — от температуры воздуха и воды, от площади водной поверхности. Выпадению же осадков может способствовать повышенная шероховатость местности, которая оказывает влияние на движение воздуха на высотах до нескольких метров. Увеличивая шероховатость, снижая величину солнечной радиации и скорости ветра, лесные насаждения могут влиять на количество испаряемой влаги и выпадающих осадков.

Осушение болот и вырубка лесов на первых порах увеличивают сток, поскольку срабатывают вековые запасы грунтовых вод, снижается транспирация. Круговорот воды на подвергшейся такому воздействию территории становится менее устойчивым из-за ослабления инерционной составляющей, роль которой играли лес или болото. Однако по мере приближения трансформированной системы к новому, менее инерционному состоянию равновесия с более высокой амплитудой водности ("водность" — понятие, применяемое для сравнения стока одной и той же реки в разные периоды в отличие от "водности" — понятия, применяемого для сравнения стока разных рек за один и тот же период) и скоростью водооборота водообеспеченность территории опускается на более низкий уровень. Водные ресурсы местности уменьшаются.

Анализируя процессы, влияющие на водность источников, можно выделить следующие причины истощения водных ресурсов.

Рис. 72. Схема влияния почвы на элементы водного баланса:

*И* — испарение; *П* — подземная составляющая речного стока; *Р* — поверхностный сток, поступающий в реки





1. Поскольку лес и болота являются естественными регуляторами речного стока, уменьшение подземной составляющей стока связано со сведением лесов на берегах рек, в их верховьях и с осушением верхних болот.

2. Сведение лесной и кустарниковой растительности на склонах и их распашка приводят не только к уменьшению подземного стока, от которого зависит водность рек, но и к увеличению эрозионных процессов, из-за чего мелеют реки, так как при этом происходит смыв почвы в реки. Заиление речных русел продуктами эрозии ухудшает их дренажное влияние на грунтовые воды. В результате малые реки, являющиеся источником питания больших рек, пересыхают.

3. Заиление малых рек способствует разрушению плотин и запруд в период половодья, что происходит из-за некачественного строительства и отсутствия достаточного проектного обоснования.

4. Существенное влияние на сток оказывает выпас скота. Интенсивный выпас скота увеличивает поверхностный сток в 4,5 раза из-за уплотнения почвы и снижения ее инфильтрационной способности, а также из-за интенсивного выедания трав скотом, нарушающего слой дерна, который при его наличии способствует улучшению инфильтрационной способности почвы. Поэтому лес, в котором пасут скот, теряет свои ценные водорегулирующие свойства. Последние нарушаются также при использовании тяжелых трелевочных тракторов для промышленных рубок леса.

5. Повышенному испарению и фильтрационным потерям воды способствуют обширные мелководья водохранилищ, занимающие большие площади, вырубка лесов по их берегам и по берегам оросительных каналов.

6. Нарушения естественного питания речных водосборов вследствие строительства дорог.

7. Огромная роль в истощении стока водозаборов, особенно на нужды орошения.

#### 4.2. МЕРОПРИЯТИЯ ПО ПРЕДОТВРАЩЕНИЮ ИСТОЩЕНИЯ ВОДНЫХ ИСТОЧНИКОВ

Важнейшее звено в охране водных источников от истощения — забота о малых реках. Поэтому на последние составляют паспорта, которые включают данные о реке и ее бассейне. Это позволяет систематизировать информацию о современном состоянии рек и определить первоочередные мероприятия по восстановлению или поддержанию их водности. К ним прежде всего относятся лесные насаждения (рис. 73) на водосборах. Функции лесных полос следующие:

водораздельные (полезащитные) полосы способствуют увеличению срока снеготаяния, вследствие чего снижается поверхностный сток (рис. 74), а ветроломные — уменьшению скорости ветра (рис. 75) и, следовательно, снижению испаряемости (рис. 76) и задержанию снега на полях;

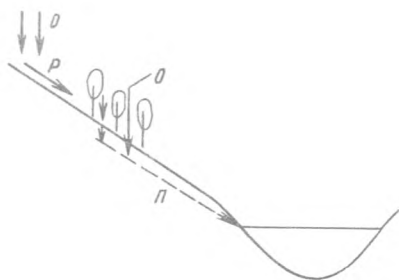


Рис. 73. Водорегулирующее действие лесной почвы:

O — осадки (остальные обозначения см. рис. 72)

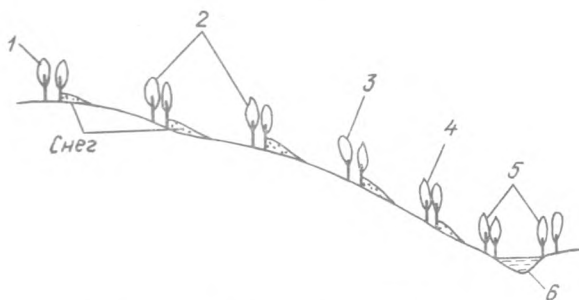


Рис. 74. Типы и расположение лесных полос:

1 — водораздельная; 2 — ветроломные; 3 — водорегулирующая; 4 — прибалочная; 5 — балочные; 6 — русло реки

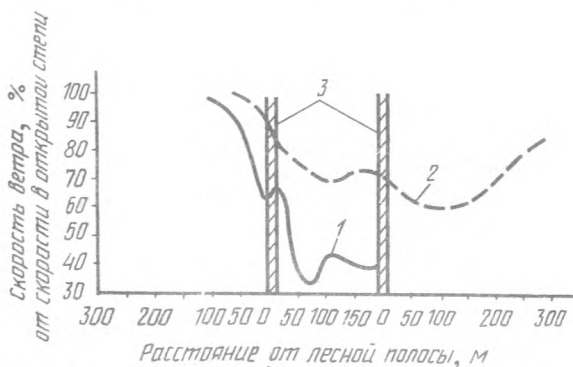


Рис. 75. Зависимость скорости ветра от расстояния до лесной полосы:

1 — период вегетации; 2 — зимой; 3 — лесные полосы

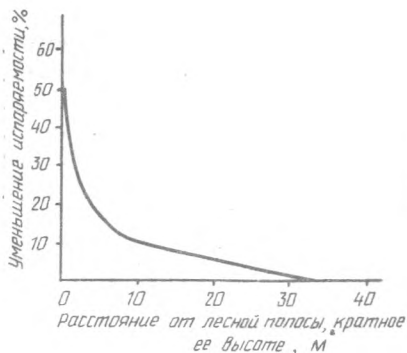


Рис. 76. Зависимость уменьшения испаряемости от расстояния до лесной полосы

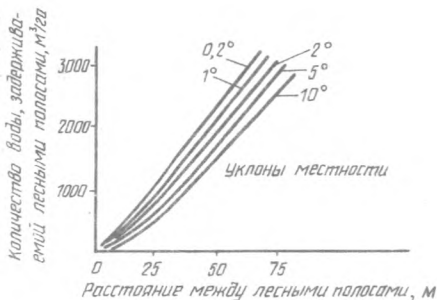


Рис. 77. К расчету расстояния между лесными полосами

водорегулирующие и прибалочные полосы уменьшают эрозию почвы, снижая поверхностный сток. При уменьшении поверхностного стока в два раза интенсивность смыва почвенного покрова снижается в три—пять раз.

Первые два типа полос устраивают под некоторым углом к направлению господствующих в данной местности ветрам. Расстояния между полосами принимают 300...450 м в зависимости от почв и рельефа.

Расстояние между водорегулирующими и прибалочными полосами рассчитывают в зависимости от уклона местности и от количества воды, которое должна задержать лесная полоса (рис. 77). Количество воды  $V$ , которое притекает к лесной полосе, приближенно можно определить по зависимости

$$V = 0,1SB, \quad (203)$$

где  $S$  — поверхностный сток, мм;  $B$  — ширина необлесенного склона выше лесной полосы, м.

Балочные леса расположены ниже других по склону. Их функция аналогична функциям вышеперечисленных полос.

Колковые леса расположены разрозненно на территории полей. Обычно это естественные островки леса. Они задерживают снег, уменьшают испарение, повышают влажность воздуха. Интенсивность водорегулирования зависит от залесенности.

Леса имеют не только водоохранное значение. Благодаря лесам может быть повышена урожайность. Например, на защищенных лесными полосами полях сумма температур в течение вегетационного периода выше из-за снижения скорости ветра, а глубина промерзания почвы меньше (рис. 78) за счет увеличения снега на полях.

Лесные полосы проектируют также вдоль оросительных каналов, дорог. Для улучшения стока талых вод в открытый канал предусматривают временные водосточные борозды в направлении, перпендикулярном лесным полосам.

Для борьбы с эрозией проводят гидротехнические мероприятия, заключающиеся в террасировании склонов и устройстве специальных гидротехнических сооружений, предотвращающих дальнейшее развитие оврагов. Гидрологическая эффективность террасирования обусловлена уменьшением поверхностного стока в 5 раз в связи с выполаживанием склонов (рис. 79).

Должительный эффект террасирования усиливается при сочетании с травосеянием. Корневая система растений закрепляет почву и по мере сгущения травостоя препятствует ее размыву.

Для борьбы с эрозией используют также агротехнические мероприятия (восстановление и повышение плодородия и структуры почвы, применение специальных способов ее обработки).

Сохранению водности источников способствуют лесомелиоративные мероприятия по берегам водохранилищ, прудов и озер.

Уменьшению испарения способствуют посадка лесных полос по берегам и осушение мелководий.

В охране водных ресурсов от истощения особое значение придать сохранению верховых болот, служащих источником питания малым рекам, регулирующим сток. Принимая решение о проведении осушения, необходимо сопоставить выгоду (получение пашни) и отрицательные последствия — потеря урожая ягод (клюквы, черники), экологическое неблагополучие местности. Поэтому к осушению болот нужно подходить с большой осторожностью, предусматривая мероприятия по снижению отрицательных последствий мелиорации. К их числу относится создание заповедных зон — мест гнездовья птиц, обитания животных, сохранения болотной флоры.

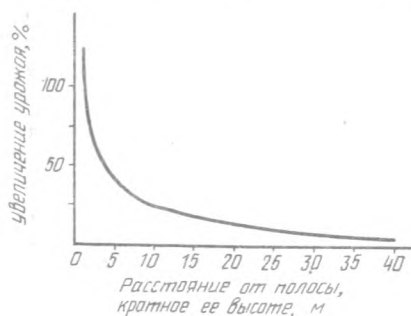


Рис. 78. Зависимость увеличения урожая зерновых культур от расстояния до лесной полосы

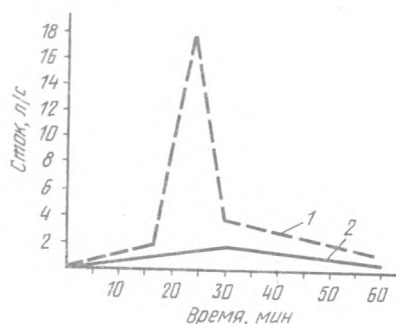


Рис. 79. Графики дождевого стока с нетеррасированного (1) и террасированного (2) водосборов

## Контрольные вопросы и задания

1. Какую роль играют реки с малыми водосборами в обеспечении водными ресурсами средней полосы России?
2. Какова роль малых рек в водообеспеченности крупных?
3. Где целесообразнее развивать богарное земледелие — на водоразделе или на пойменных землях?
4. В чем заключается оптимизация социально-экономической деятельности на водосборе с точки зрения улучшения водности реки?

## Глава 12

### ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ВОДНЫХ РЕСУРСОВ МАЛЫХ ВОДОСБОРОВ

#### 43. ВЛИЯНИЕ ЕСТЕСТВЕННЫХ УСЛОВИЙ ВОДОСБОРНОЙ ПЛОЩАДИ НА ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ВОДНЫХ РЕСУРСОВ МАЛЫХ РЕК

Малыми водотоками считают ручьи длиной до 50 км, малые реки по этой классификации имеют длину от 50 до 200 км. Малые водотоки по длине в бывшем СССР составляли 84,5 %, из них 58,3 % — водотоки длиной менее 10 км. На долю малых водотоков и рек приходится 94,6 % протяженности всей речной сети.

На водосборах этих рек формируется около половины стока, а в некоторых регионах — до 95 %.

В России 2,5 млн малых рек, они формируют около половины суммарного объема речного стока. В бассейнах этих рек проживают 44 % всего городского населения и 90 % сельского.

#### 44. ИЗМЕНЕНИЯ СОЦИАЛЬНО-ЭКОНОМИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ НА ВОДОСБОРАХ МАЛЫХ РЕК

Большое влияние на малые реки оказывает хозяйственная деятельность. Начало ее влияния можно отнести к XVIII веку, в период интенсивного сельскохозяйственного и промышленного освоения территории России. В это время строят водяные мельницы, заводские водохранилища, вырубает леса на больших территориях для приготовления древесного угля и создания сельскохозяйственных угодий. Стали создаваться большие шахты, карьеры, а следовательно, появились отвалы и терриконы. Люди переселялись в города, в связи с чем увеличивалось число промышленных и городских сточных вод. Однако это не вызывало необратимых изменений в экосистемах малых рек.

Существенное нарушение естественного режима малых рек произошло в последние 30...40 лет. В этот период созданы почти все наиболее значительные водохранилища, резко увеличилось промышленное и хозяйственно-бытовое водопотребление и водоотведение,

начали проводить гидромелиорации, вносить в больших количествах минеральные удобрения и использовать ядохимикаты.

Все это сильно изменило гидрогеологический и гидрохимический режимы малых рек. Под действием этих процессов реки вступают в последнюю фазу существования, характеризующуюся заилинием русел, зарастанием и заболачиванием.

Существенно на сток малых рек влияют изъятие воды на хозяйственно-бытовые нужды, для целей промышленности и сельского хозяйства, сброс сточных вод, регулирование стока в пространстве и во времени.

На современном уровне зарегулированности малых рек прудами происходит некоторое снижение годового стока: в средний год не более чем на 10 %, а в маловодный – до 25 %; меженный сток при наличии регулирования увеличивается на 50 % в годы средней водности и на 35 % в маловодные годы.

Не меньше на сток влияет деятельность человека на водосборе: вырубка леса, агротехнические мероприятия, распашка территории. Все это изменяет водный и тепловой режимы почвы, снижает подземный сток, увеличивает поверхностный главным образом за счет весеннего. В целом эти воздействия изменяют сток.

Для перспективного планирования разрабатываются схемы комплексного использования и охраны водных ресурсов для типичных малых рек. В этих схемах на период 20...30 лет планируется упорядочение водопотребления и водоотведения в бассейнах малых рек, создание водоохраных зон, обеспечение чистоты стока на водосборе, сохранение естественных экосистем.

#### 45. РАЦИОНАЛЬНОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ВОДНЫХ РЕСУРСОВ И РАЗВИТИЕ РЕЧНОГО БАССЕЙНА

Рациональное использование водных ресурсов малых водосборов можно осуществлять по трем направлениям: рационализация природопользования на повышенных элементах рельефа водосбора (борьба с эрозией; комплексная мелиорация земель, включающая не только орошение и осушение, но и другие виды мелиорации; рациональное лесное хозяйство, рациональное сельскохозяйственное землепользование); рационализация антропогенных воздействий в пойме реки (дозированное затопление поймы; борьба с наводнениями путем расчистки русла реки, русловыправительных работ, создания защитных дамб и рельефов. Кроме того, осушение пойменных и надпойменных болот и переувлажненных территорий) и оптимизация водосбора из реки и водоотведения в нее (оптимизация водораспределения между отдельными участниками водохозяйственного комплекса, управление качеством вод, включая очистку сточных и сбросных вод и сохранение водной экосистемы для увеличения самоочистительной способности реки).

**Влияние гидромелиорации на водные ресурсы малых рек.** Было

установлено, что годовой сток при орошении не только уменьшается, но и существенно ухудшается по качеству.

В связи с подъемом грунтовых вод в условиях выпотного режима в случае повышенной минерализации грунтовых вод происходит вторичное засоление, а в случае пресных грунтовых вод – антропогенное заболачивание. Интенсивная инфильтрация оросительной воды способствует увеличению дренажного стока, который в ряде случаев имеет повышенную минерализацию, что снижает качество вод реки-водоприемника.

Под действием длительного орошения меняется направленность почвообразовательного процесса.

Существенное влияние на гидрологический и гидрохимический режимы малых рек оказывает орошение черноземов. При избыточном орошении даже слабоминерализованными водами вымываются соли кальция и гумус из почвы, теряется водопроходная структура и повышается эрозия, что, в свою очередь, ведет к смыву почвы в русла малых рек и существенно изменяет их морфологические характеристики.

Большинство из этих отрицательных последствий могут быть ликвидированы при широком применении на водосборной площади комплексных мелиораций, цель которых – оптимальное управление геологическим и биологическим круговоротами на водосборе. При сочетании гидротехнических, агротехнических и лесотехнических мелиораций можно добиться устойчивости биогеоценозов в системе водосбор – пойма – река и, как следствие, рационального использования водных ресурсов.

Существенных успехов в области рационального использования водных ресурсов малых рек можно достичь, управляя режимом паводков.

Паводки как природное явление, под действием которого формируются пойма и русло, – неотъемлемый процесс, стабилизирующий экосистему поймы.

В процессе паводка промывается русло от выведенных из биологического оборота веществ, что предохраняет реку от вторичного загрязнения. Илистые фракции выносятся на пойму, и таким образом энергия, накопленная в водных экосистемах, перемещается в почвы пойм, что повышает их плодородие.

Кроме того, временное затопление поймы дает возможность промыть засоленные почвы и тем самым еще более повысить плодородие.

Вместе с тем неуправляемые паводки приводят к большим разрушениям построек и сооружений, находящихся в поймах рек. В прошлом (10...15 лет назад) одним из наиболее распространенных способов увеличения пропускной способности русла реки являлись русловыправительные работы. Однако в последнее время из-за существенного нарушения в результате этих работ водной экологической

системы и значительного влияния на режим грунтовых вод прилегающих к реке территорий от этого способа отказались.

Основные методы управления паводками: создание небольших русловых водохранилищ, обвалование затопливаемых территорий и создание польдеров, на которых водный режим можно регулировать оптимально благодаря наличию осушительно-оросительной сети.

Управление режимом стока на водосборе и паводками является долговременными мерами, которые не позволяют оперативно управлять водными ресурсами малой реки в каждый момент времени.

Оперативное управление количеством и качеством водных ресурсов возможно при создании автоматизированной водохозяйственной системы управления, предпосылками построения которой являются создание замкнутых систем водоснабжения в промышленности, использование коммунально-бытовых сточных вод для целей орошения, создание водооборотных осушительно-оросительных систем, использование для очистки сточных и дренажных вод биотехнологических сооружений, биологических прудов, фитофльтрационных устройств, биоплато.

Анализ работ по благоустройству и оздоровлению малых рек показывает, что успешно выполняется комплекс мероприятий при проведении мелиоративных, противопаводковых и берегоукрепительных работ. Наибольшие трудности встречаются в организации работ по устранению последствий загрязнений, благоустройству русл и прирусловых территорий, осуществлению водоохранных мероприятий.

Наиболее простое водоохранное мероприятие – установление водоохранной зоны.

*Водоохранная зона* – это территория, прилегающая к акваториям рек, озер и водохранилищ, на которой устанавливается специальный режим в целях предотвращения загрязнения, засорения, истощения вод и заиления водных объектов.

Водоохранная зона является составной частью природоохранных мероприятий, улучшающих гидрологический и гидрохимический режимы водного источника.

В водоохранную зону входят поймы рек, надпойменные территории, бровки и крутые склоны берегов, а также балки и овраги, непосредственно входящие в речную долину и озерную котловину.

Минимальная ширина водоохранных зон зависит от расстояния до истока реки и изменяется от 15 м на расстоянии 10 км от истока до 500 м на расстоянии свыше 500 км от истока.

Для озер и водохранилищ водоохранную зону устанавливают в зависимости от площади акватории. При площади акватории до 2000 км<sup>2</sup> минимальная ширина водоохранной зоны составляет 300 м, а при большей акватории – 500 м и более.

В пределах водоохранных зон выделяют *прибрежные полосы* – территории строго ограниченной хозяйственной деятельности с учетом прогноза переработки берегов за десятилетний период. Минимальная



ширина прибрежной зоны зависит от крутизны прилегающих склонов и видов угодий на них. Так, при распаханых прилегающих территориях ширину прибрежной полосы при нулевом (или обратном) уклоне прилегающих склонов назначают 15...30 м, до трех градусов – 15...25, при больших уклонах – 55...100 м.

При окружении водного источника лугами и сенокосами ширину прибрежных полос сокращают до 15...50 м, а залесенными территориями (лес, кустарник) – до 35...100 м в зависимости от уклона.

В водоохраных зонах водоисточников запрещается: проведение авиационно-химических работ; применение ядохимикатов; использование навозных стоков; размещение складов и площадок для заправки ядохимикатами и минеральными удобрениями, а также горючесмазочными материалами; размещение животноводческих комплексов, ферм, мест захоронений, складирования навоза, мусора и отходов производства, вырубка лесов (кроме санитарной и лесовосстановительной). Кроме этого, запрещается стоянка автомобилей и заправка их топливом, мойка и ремонт любой техники.

В пределах прибрежных полос кроме запретов, действующих в водоохраных зонах, вводят еще запреты на распашку земель, выпас скота, применение удобрений, установку палаточных городков.

Прибрежные полосы рекомендуют занимать древесно-кустарниковой растительностью или залужать.

Решение об установлении водоохранной зоны исполнительными органами власти доводится до сведения всех лиц и предприятий, осуществляющих природопользование в водоохранной зоне; на этих же лиц возлагаются обязанности поддержания надлежащего состояния водоохраных и прибрежных зон. Контроль за соблюдением режима хозяйственной деятельности в водоохранной зоне и прибрежных полосах возлагается на органы по охране природы.

#### **46. ОПТИМИЗАЦИЯ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ВОДНЫХ РЕСУРСОВ ПРИ СОЦИАЛЬНО-ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ**

Исследования последних лет показали, что малые реки не отвечают закономерностям больших рек, протекающих в данной зоне. Поэтому подходы к оптимизации использования водных ресурсов должны быть специфическими для каждого малого водосбора. Учитывая это обстоятельство, можно заключить, что основой оптимизации является схема комплексного использования водных ресурсов в бассейне малой реки.

Составление таких схем затруднено отсутствием единого методического подхода к расчету стоковых гидрологических и гидрохимических характеристик в условиях ограниченной гидрометрической наблюдательной сети.

В схемах отражают природно-экономические условия бассейна, включающие сведения о хозяйственной освоенности территории, гидрографию и гидрологию водотоков, геологические и гидрогеологи-

ческие условия, почвенный покров, растительность. Описывают санитарно-техническое состояние водных ресурсов и современное их использование. Рассматривают перспективы народнохозяйственного использования рек бассейна и требования к качеству вод. Разрабатывают водоохранные мероприятия.

Критерием оптимизации использования водных ресурсов в схеме может быть или максимум народнохозяйственного эффекта, или минимум приведенных затрат, включая и затраты на сохранение и восстановление природных комплексов.

Схема комплексного использования и охраны водных ресурсов должна быть выполнена как элемент структуры управления качеством жизни человека. В этом случае рекомендованные мероприятия достигают цели.

Проблема социально-экологического обоснования развития водохозяйственных систем на малых водосборах чрезвычайно актуальна. Большое число малых рек и их малая изученность требуют создания международных экспериментальных полигонов в характерных бассейнах малых рек. На этих полигонах по единой методике можно проводить комплексные исследования, направленные на выработку рекомендаций по использованию и охране водных ресурсов, рекреации, ведению рыбного и охотничьего хозяйства, сохранению экосистем, рациональному использованию водных, земельных и лесных угодий.

Такие полигоны-бассейны могут быть эталонами технических решений по рациональному природопользованию в условиях возрастающей антропогенной нагрузки. Результаты таких исследований могут дать возможность разработать систему экономических и экологических нормативов, которые будут способствовать внедрению прогрессивных научно-технических решений.

### *Контрольные вопросы и задания*

1. Что называют истощением водоисточника?
2. Как болота и водохранилища влияют на водность рек?
3. Почему нельзя осушать верховые болота?
4. Почему в первую очередь необходимо стремиться сохранять подземный сток рек?
5. Какие мероприятия по предотвращению истощения водных ресурсов вы знаете?

## **Глава 13**

### **ВЛИЯНИЕ ГЭС НА ОКРУЖАЮЩУЮ СРЕДУ**

Гидроэнергетические объекты существенно влияют на окружающую среду и особенно сильно их водохранилища. Каскад водохранилищ настолько меняет гидрологический, а иногда и сейсмический режимы местности, что последствия этого сказываются на природных условиях в региональном масштабе.

Создание водохранилищ влечет за собой затопление территорий. В зону затопления могут попасть сельскохозяйственные угодья, месторождения полезных ископаемых, промышленные и гражданские сооружения, памятники старины, дороги, лесные массивы, места традиционного обитания животных и растений и т. д. На равнинных реках при сработке водохранилищ в меженный период освобождаются значительные площади, которые могут частично заболачиваться и служить рассадником комаров, гнуса и т. п., что недопустимо. При наполнении водохранилищ в период больших расходов эти земли вновь затапливаются. Так, доля сельскохозяйственных земель, затопленных водохранилищами Волжско-Камского каскада ГЭС, составляет 48 % всей затопленной территории, из них около 38 % – леса и кустарники. В пустынной и полупустынной зонах 3/4 всех затопленных земель приходится на пастбища. Поэтому в первую очередь определяют местоположение водохранилища, рассматривая различные варианты, и выбирают оптимальный с учетом природоохранных критериев.

Принято выделять два периода, отличающихся по характеру взаимодействий гидротехнического объекта с окружающей средой: строительный и эксплуатационный.

Первый период охватывает несколько лет. За это время в районе строительства резко усиливается уровень шума (уровень акустического загрязнения местности часто превышает 100 дБ), коммунально-бытовые стоки строительного поселка и механические примеси (песок, глина) могут загрязнять реку.

Значительно нарушается естественный ландшафт местности.

Многие профилактические мероприятия, призванные защитить внешнюю среду от негативных последствий, проводят именно в этот период. Ложе водохранилища очищают от леса, кустарника, загрязнений; выбирают торфяные залежи, которые могут всплыть при наполнении водохранилища; вывозят плодородный почвенный слой; перемещают диких и домашних животных; переносят жилые и промышленные здания, объекты, имеющие историческую и культурную ценность; благоустраивают жилища и строят средства коммуникаций во вновь созданных поселках.

Удельные площади затопления, т. е. отношение площади зеркала водохранилища ГЭС к ее установленной мощности, колеблются в широких пределах, например для Цимлянского водохранилища они составляют 16,4, а для Нурекского – 0,05. В общем случае энергетическая эффективность затопления будет выше там, где указанный показатель ниже, т. е. в горной местности.

Обычно в этот период начинают наполнять водохранилище, меняются расходы и уровень воды реки в нижнем бьефе.

Строительство – начало процесса расшатывания и нарушения исходных взаимосвязей природного объекта с окружающей средой. Поэтому основная задача строительного периода – сделать переход к

новому состоянию преобразуемого объекта по возможности более плавным.

Всестороннее влияние гидротехнических объектов на окружающую среду проявляется в период эксплуатации.

В водохранилищах гидроузов формируются, как правило, неустойчивые, нестабильные экосистемы. Влияние водохранилища на окружающую среду может быть как положительным, так и отрицательным. Зависит оно от географического положения и типа водохранилища (горное, предгорное, равнинное); геологического строения и гидрогеологической характеристики его ложа и бортов; площади, конфигурации и объема водохранилища, глубины его сработки и режима эксплуатации и т. п.

Так, подтопление прилегающих к водохранилищу земель происходит из-за подъема уровня грунтовых вод и вызывает переувлажнение почвы и отмирание корней растений.

С ухудшением водно-воздушного режима могут произойти заболачивание и оглеение почвы, что снижает ее качество и продуктивность. В засушливых же районах при соответствующих глубинах грунтовых вод подтопление отчасти улучшает условия произрастания растений, но одновременно может засолить почвы.

Для снижения площадей затопления и подтопления земель при создании ГЭС выбирают наиболее приемлемый по топографическим и гидрогеологическим условиям створ сооружений, оптимальную по условиям сохранения земель и обеспечения мощности ГЭС нормальную подпорную отметку водохранилища; схемы размещения дамб обвалования и комплекса гидромелиоративных сооружений в пределах защищенных земель, включающего проводящую и ограждающую сеть, шлюзы-водосборы и насосные станции с регулирующими резервуарами, и определяют объемы подсыпок и берегоукрепления.

Инженерную защиту широко используют на гидроузлах, особенно равнинных рек. На днепровских водохранилищах защищено 180 населенных пунктов (включая 10 городов), 185 тыс. га пойменных земель, 65 предприятий, 6 тыс. км железных и автомобильных дорог, 5 тыс. км линий связи и электропередач. Общая протяженность дамб обвалования составила 320 км.

Сооружение крупных водохранилищ, кроме того, создает условия для возникновения или повышения сейсмической активности в прилегающих к ним районах. Например, до постройки плотины Нурекской ГЭС в этом районе в среднем регистрировалось 3...4 землетрясения в декаду. При заполнении водохранилища (1972 г.), когда глубина его достигла 100 м, число землетрясений возросло до 30...40 в декаду. Это потребовало замедления режима наполнения водохранилища.

Подъем и снижение уровней воды в водохранилище при регулировании стока, а также волновые явления на обширной акватории приводят к трансформации берегов (размыву и обрушению крутых

склонов, срезке мысов, кос и т. п.). Масштабы трансформации берегов зависит от геологического строения, режима уровней воды и глубины водохранилища исходной конфигурации берегов, господствующих ветров и т. д. Относительная стабилизация береговой линии происходит лишь через 5...20 лет после наполнения водохранилища.

Заиление водохранилищ и формирование подводного рельефа донных отложений происходят под влиянием следующих факторов: формы, размеров и гидродинамики водоема, затопленного рельефа, объема и состава наносов, поступающих со стоком и от размыва берегов. Водохранилища аккумулируют большую часть наносов, из них только 4...10 % сбрасывается в нижний бьеф, а 90...96 % идет на формирование донных отложений.

Вследствие снижения скорости течения и уменьшения перемешивания воды по глубине существенно изменяются физико-химические характеристики воды в водохранилище по сравнению с бытовыми условиями реки до создания водохранилища. Аккумуляция в водохранилищах некоторых веществ улучшает качество воды. Селективный сброс воды в нижний бьеф отчасти решает эту проблему. Качество воды ухудшается нарушением гидрологического режима в нижнем бьефе. Весной расходы и уровни воды в нижнем бьефе уменьшаются, а в период летней и зимней межени повышаются по сравнению с бытовыми условиями реки до создания водохранилища. Снижение расходов и уровней воды в половодье может повлечь за собой образование суходолов на пойме, вызвать запоздание и уменьшение продолжительности весеннего нереста рыб, но в то же время и предотвратить наводнение.

Рост расходов воды в межень благоприятно сказывается на санитарно-гигиеническом состоянии реки, позволяет обеспечить орошение полей, повысить судоходные глубины, увеличить мощность и выработку энергии ГЭС.

Зимой при авариях в энергосистеме на несколько часов или суток требуется резкое увеличение мощности ГЭС, что может повлечь за собой повышение уровня воды в нижнем бьефе. Резкие изменения уровня и расходов воды могут вызвать местный размыв (по сравнению с неизбежно протекающим вследствие увеличения трансформирующей способности потока после отложения наносов в водохранилище общим размывом) русла в нижнем бьефе.

Вода из водохранилища, освободившись от наносов, попадает в нижний бьеф осветленной, а это неблагоприятно для рыбного хозяйства, так как в ней уменьшается содержание биогенных веществ, полезных для водных организмов.

Резкое снижение уровней воды в нижнем бьефе при суточном и недельном регулировании может осложнить водоснабжение промышленности и коммунального хозяйства, ухудшить условия судоходства, затруднить использование реки для отдыха и спорта, а в период нереста рыбы вызвать обмеление нерестилищ и гибель икринок.

Кроме того, могут наблюдаться и другие негативные последствия. Так, суточное регулирование Рижской ГЭС вызывает резкое проникновение осолоненных морских вод в Даугаву. Во избежание этих последствий суточное регулирование мощности ГЭС ограничивается.

Большая часть неблагоприятных воздействий в нижнем бьефе исключается или значительно ослабляется при каскадном расположении гидроузлов. Природоохранная роль каскада проявляется во взаимном согласовании режимов работы вышележащей и нижележащей ГЭС с целью улучшения экологического состояния бьефов и прилегающих территорий.

Установлено пагубное влияние перенасыщения воды азотом воздуха на ценные популяции рыб, возникающие при сбросах паводковых вод через плотину, когда в поток вовлекается воздух и количество газа в воде превышает норму. Степень пересыщения потока азотом и кислородом зависит от конструкции водослива и водобойного колодца плотины. В паводки на каскаде ГЭС газами пересыщается большой участок реки. Установлено, что после прекращения сбросов воды в реке устанавливается нормальный газовый режим.

Мероприятия по уменьшению содержания азота в бьефах каскада ГЭС должны быть направлены на снижение холостых сбросов паводковых вод через водосливную плотину с одновременным увеличением расходов воды через ГЭС и на поддержание в нижнем бьефе режима сопряжения, обеспечивающего наименьшую аэрацию потоков.

Положительное влияние водохранилища как регулятора стока сказывается на территории, значительно большей, чем площадь его акватории. Так, орошение земель и защита плодородных угодий от наводнений, осуществляемые с помощью водохранилищ ГЭС, охватывают площади, иногда значительно превышающие площади затопления.

Плотины, здания ГЭС, шлюзы, каналы и т. п., удачно вписанные в рельеф местности и хорошо архитектурно оформленные, создают вместе с экваторией живописные ансамбли. Технологический процесс производства гидроэнергии экологически безвредны. При нормальном состоянии оборудования ГЭС практически отсутствуют какие-либо вредные выбросы в окружающую среду.

Однако при работе ГЭС могут иметь место выбросы загрязнений в водоток, вызванные аварийной ситуацией, носящие разовый или постоянный характер, например при поступлении в воду турбинного масла в результате систематических протечек и залповых выбросов, связанных с повреждением турбин. Нормами допускаются утечки масла, не превышающие 200 г в сутки для одного агрегата.

От такого загрязнения в первую очередь страдают планктонные организмы, икра и мальки рыб. Требуются недели и месяцы, чтобы распространившееся в воде масло подверглось биодegradации, в ходе которой азробные бактерии разложили бы его на безопасные составляющие. В водоемах рыбохозяйственного назначения допускается

содержание масла в воде не выше 0,01 мг/л. Если утечка масла из агрегата не более 200 г/сут, расход воды через него должен быть не менее 0,25 м<sup>3</sup>/с. В современных гидромашинах расход воды во много раз больше и изменяется от 30 до 600 м<sup>3</sup>/с.

Контроль за выбросами масла и загрязнением нижнего бьефа гидроузла осуществляют косвенно, фиксируя доливки масла в систему.

Для уменьшения эксплуатационных и аварийных выбросов масла необходимо: совершенствовать конструкции элементов гидротурбин, подверженных старению и увеличению протечек масла; сбрасывать в водоем незагрязненными сточные производственные воды; очищать и хлорировать хозяйственно-бытовые сточные воды перед выпуском; вывозить на свалки твердые осадки из отстойников.

Электроэнергию, выработанную ГЭС, передают по высоковольтным линиям напряжением 35 кВ и выше. Протяженность этих линий в бывшем СССР превышала 700 тыс. км. Сооружают и вводят в строй высоковольтные линии напряжением 500 и 1150 кВ, которые практически не загрязняют окружающую среду, хотя в результате неизбежно теряются земли, вырубается леса, создаются радиопомехи и шумы. Кроме того, электромагнитное поле, создаваемое при протекании по высоковольтным линиям переменного тока промышленной частоты (50 Гц), неблагоприятно воздействует на живые организмы и растительный мир. Максимальная напряженность поля, получаемая под высоковольтной линией 330 кВ, равна 3,5...5 кВ/м, под 770 кВ – 7,5...8, а под 750 кВ – 10...15 кВ/м.

Электрическое поле индуцирует токи в теле человека и заряды на его поверхности. При напряженности электрического поля 12 кВ/м индуцируемый ток в теле человека составляет около 0,18 мА. Неблагоприятное действие на организм начинает проявляться при напряженности электрического поля 1 кВ/м. Наиболее чувствительна к такому воздействию нервная и сердечно-сосудистая системы.

Спустя некоторое время после стабилизации, достигающее двух и более десятков лет, налаживаются устойчивые взаимосвязи окружающей среды и гидротехнического объекта. Водохранилище, само оказывая значительное влияние на природные условия местности, как бы становится ее "полноправным членом", существенно трансформируя исходное состояние земель водосборной площади.

### *Контрольные вопросы и задания*

1. Какие преимущества дает использование ГЭС по сравнению с ТЭС и АЭС в отношении охраны природы?
2. Какая схема гидроузла для ГЭС (плотинная или деривационная) предпочтительнее с точки зрения подтопления прилегающей территории?
3. Как уменьшить отрицательное влияние разрежения потока воды в турбинах ГЭС на падающих в него мальков рыб?
4. Какие положительные факторы влияния ГЭС на окружающую среду вы знаете?

## КОМПЕНСАЦИЯ УЩЕРБОВ ПРИ СОЗДАНИИ ВХК

Создание ВХК невозможно без изменения природных условий и сложившейся хозяйственной практики. Значительная часть изменения природных условий – ожидаемое положительное следствие водохозяйственного строительства. Однако часть изменений имеет негативный характер (например, затопление и подтопление территорий, изменение микроклимата и гидрологического режима нижнего бьефа водохранилищ).

Экономическая оценка отрицательного воздействия проектируемого водохозяйственного комплекса на окружающую природную и хозяйственную среду заключается в определении затрат, компенсирующих возникающий ущерб при невозможности его предупреждения, и затрат на мероприятия, предупреждающие или ограничивающие отрицательное воздействие.

В *первую группу* затрат входят затраты на переселение населения, передислокацию предприятий, линий связи, транспортных объектов и т. п. с затопляемых земель, освоение новых сельскохозяйственных угодий и увеличение продуктивности используемых земель, обеспечивающих получение сельскохозяйственной продукции взамен теряемой на затопляемых землях, воссоздание леса на новых землях, сооружение специальных прудовых хозяйств, рыбоводных заводов для компенсации ущерба рыбному хозяйству и т. д.

Во *вторую группу* затрат входят затраты на инженерную защиту земель и объектов, попадающих в зону воздействия водохранилищ, на санитарную подготовку ложа водохранилищ, устройство рыбопускных и рыбозащитных сооружений и другие мероприятия.

При определении компенсирующих затрат руководствуются положениями о порядке проведения мероприятий по подготовке зон затопления водохранилищ и исчисления затрат по переселению населения, переносу и сносу строений и проведению работ, связанных со строительством водохранилищ.

Затраты на создание водохранилищ составляют значительную часть общих затрат на строительство водохозяйственных комплексов, особенно для водохранилищ многолетнего регулирования на равнинных реках в обжитых районах. Структура затрат на строительство водохранилищ зависит от природных и экономических условий, в первую очередь от степени и специализации сельскохозяйственного освоения района, плотности населения, организации транспортного обслуживания. Очевидно, что большое значение имеют параметры водохранилища и режим его будущего использования.

В плотнозаселенных сельскохозяйственных районах наибольший удельный вес (до 70...80 % в отдельных случаях) в общих затратах по водохранилищу имеют затраты на переселение населения и компенсацию ущерба сельскому хозяйству.



Количество переселенных жителей зависит от параметров водохранилища, высоты плотины и района строительства (табл. 23).

23. Число жителей, переселенных из зон затопления, в зависимости от параметров водохранилища

| Водохранилище               | Полный объем, км <sup>3</sup> | Площадь зеркала, км <sup>2</sup> | Длина водохранилища, км | Высота плотины, м | Число переселенных жителей, тыс. человек |
|-----------------------------|-------------------------------|----------------------------------|-------------------------|-------------------|--|
| Куйбышевское                | 58                            | 6450                             | 650                     | 29                | 150                                      |
| Братское                    | 164,9                         | 5470                             | 565                     | 106               | 68                                       |
| Рыбинское                   | 25,4                          | 4550                             | 360                     | 18                | 116                                      |
| Цимлянское                  | 23,9                          | 2702                             | 360                     | 26                | 40                                       |
| Кременчугское               | 13,5                          | 2252                             | 185                     | 17                | 130                                      |
| Каховское                   | 18,2                          | 2155                             | 23                      | 16                | 45                                       |
| Горьковское                 | 8,2                           | 1591                             | 430                     | 17                | 31                                       |
| Новосибирское               | 8,8                           | 1070                             | 203                     | 20                | 30                                       |
| Токтогульское (Таджикистан) | 19,5                          | 284                              | 65                      | 180               | 20                                       |
| Нурекское (Таджикистан)     | 10,5                          | 98                               | 70                      | 300               | 5  |

Организация переселения людей является наиболее сложной частью проекта ВХК, так как необходимо решать комплекс социальных, национальных и других вопросов, например вопросы трудоустройства населения, организации отдыха, связи, транспорта и т. п.

При решении вида компенсации жителям, переселяемым из зоны затопления, руководствуются следующими соображениями.

Жилые дома и другие здания при технической возможности целесообразно перенести и восстановить на новом месте. При этом затраты на эти мероприятия (разборка, перевозка разобранных материалов, сборка на новом месте и т. п.) вносят в смету строительства. Строения, перенос которых нецелесообразен или невозможен по техническому состоянию, сносят, а в смету вносят затраты на компенсацию сносимых строений (с учетом их износа). При сносе школ, лечебных, детских, культурных учреждений предусматриваются затраты на строительство по типовым проектам зданий той же вместимости. Населению должна быть предоставлена возможность получения квартиры в благоустроенном коммунальном доме по действующим санитарным нормам.

Ущерб от затопления сельскохозяйственных земель компенсируют, внося в смету затраты на освоение новых земель или интенсификацию старопахотных земель с целью полного восстановления потерянной при затоплении сельскохозяйственной продукции. Разработаны нормативы стоимости освоения новых земель взамен изымаемых для несельскохозяйственных нужд с поправочными коэффициентами, учитывающими качество почв. В перечень мероприятий,

на которые можно использовать средства, предназначенные для возмещения потерь сельскохозяйственных земель при их изъятии, входят работы по окультуриванию земель, повышению их плодородия, засыпке и выполаживанию оврагов, освоению крутых склонов со строительством гидротехнических сооружений по защите почв от эрозии и оползней, по известкованию и гипсованию имеющихся сельскохозяйственных угодий, по проведению мелиоративных мероприятий с целью улучшения земель, созданию защитных лесных насаждений и другим мероприятиям, связанным с освоением земель и улучшением угодий, представляемых хозяйствам взамен изымаемых. Кроме ущербов от затопления сельскохозяйственных земель необходимо учитывать ущерб в сельском хозяйстве от изменения гидрологических условий в нижнем бьефе при создании водохранилищ. Изменение гидрологического режима водотока сопровождается осуходоливанием пашни, намерзанием льда на поймах при суточном регулировании стока, вымерзанием трав и т. д. Некоторые виды этого ущерба можно не допустить, если предусмотреть сельскохозяйственные попуски из водохранилища по особому графику, разработанному с учетом интересов других потребителей.

В некоторых случаях изменение гидрологического режима в нижнем бьефе дает положительный эффект, так как снижает ущерб от затопления сельскохозяйственных земель паводками и дает возможность интенсификации производства на пойменных землях. Это учитывают как дополнительный положительный эффект от создания гидроузла.

В районах с развитой промышленностью затраты на компенсацию ущербов состоят из затрат на переустройство или защиту жилищно-коммунальных объектов, промышленных предприятий, транспортных сооружений. При переустройстве промышленных объектов возможен их снос или перенос из зоны затопления. При сносе в смету ВХК входят затраты по восстановлению сносимых промышленных объектов за вычетом амортизационных отчислений и стоимости материалов и оборудования, используемых после сноса промышленных объектов.

При переносе промышленных объектов из зоны затопления и подтопления компенсируют затраты на транспортирование демонтируемых материалов и оборудования, монтаж последних на новом месте, а также ущерб от перерывов в производстве. При этом модернизируют, реконструируют и расширяют переносимые и восстанавливаемые объекты за счет средств соответствующих отраслей народного хозяйства без отнесения этих затрат на смету ВХК.

Одновременно с разработкой мероприятий по переносу объектов из зоны затопления рассматривают варианты их инженерной защиты.

Способ компенсации ущербов (снос, перенос, инженерная защита) выбирают сравнением приведенных расчетных затрат.

Так же поступают с объектами и памятниками культуры (археологические, исторические, уникальные геологические обнажения,

реликтовые насаждения, заповедники). Рассматривают различные варианты: инженерную защиту, перенос, воссоздание в реконструированном виде.

Сложно компенсировать ущерб рыбному хозяйству, так как определить его и эффективность компенсационных мероприятий трудно. Для предупреждения и компенсации потерь рыбной продукции в смету ВХК включают такие мероприятия, как строительство рыбопропускных и рыбозащитных устройств, рыбоводных заводов, нерестово-выростных хозяйств, искусственных нерестилищ, проведение рыбохозяйственных мелиораций и т. д. Выбор варианта осуществляют не только сравнением расчетных затрат, но и с учетом биологических и инженерных факторов, т. е. разрабатывают методику биолого-технико-экономического обоснования компенсационных мероприятий.

Иногда ущерба рыбному хозяйству можно избежать, если предусмотреть специальные рыбохозяйственные попуски для обводнения нерестилищ, которые компенсируют изменение гидрологического режима в нижнем бьефе гидроузлов. Объем и сроки этих попусков определяют на основании оптимизационных расчетов.

Большую группу составляют затраты на подготовку ложа водохранилища.

Работы по удалению лесной растительности в ложе водохранилищ разделяют на лесосводку и лесочистку.

К лесосводке относят работы по вырубке товарной древесины, к лесочистке – лесной растительности нетоварного значения, а также работы по срезке и корчевке пней. При подготовке ложа водохранилища компенсируют также дополнительные затраты, связанные со специфическими условиями рубки, отличающимися от нормальных лесозаготовок из-за срочности выполнения работ в увязке с отдельными этапами наполнения водохранилища, трудностями сплава в период перекрытия русла, перебазирования леспромхозов, рейдов, лесоперевалочных бирж, лесных поселков и других объектов лесной промышленности. Затраты по лесочистке полностью заносят в смету ВХК. Целесообразна сплошная лесочистка ложа водохранилищ, предназначенных для водоснабжения, рыбного хозяйства, рекреации. Исследования показывают, что необходима сплошная лесочистка ложа всех водохранилищ с природоохранных позиций. Невырубленный лес впоследствии обходится дороже, чем экономия от сокращения площади лесочистки.

В подготовку ложа водохранилища входят также затраты на мероприятия, направленные на ликвидацию возможных источников загрязнения воды. Эти мероприятия заключаются:

в общей санитарной очистке территорий населенных пунктов, предприятий и животноводческих ферм, расположенных в зоне затопления;

специальной санитарной очистке мест специфического загряз-

нения и зон водозаборов коммунально-бытового водоснабжения; переносе, обезвреживании или инженерной защите кладбищ и скотомогильников;

в борьбе во всплыванием торфяников;  
в охране грунтовых вод и т. д.

При возведении гидроузла ухудшаются судоходные условия или использование водного пути становится невозможным, что наносит ущерб водному транспорту. Эти затраты должны быть отнесены на смету ВХК. Компенсации подлежат также затраты на перенос объектов водного транспорта. Если гидроузел сооружают на несудоходной реке, но в перспективе предполагается сделать ее судоходной, а гидроузел препятствует этому, то в смету гидроузла включают затраты на компенсацию предполагаемых ущербов.

Необходимо отметить все увеличивающееся влияние негативных последствий на выбор варианта ВХК (структуры параметров). Предпочтение отдают вариантам, обеспечивающим существенное снижение площадей затопления и других негативных последствий, несмотря на меньшую экономическую эффективность.

### Контрольные вопросы и задания

1. Каков базовый вариант при оценке ущербов от создания ВХК?
2. По какому принципу распределяют затраты на покрытие ущербов между участника ВХК?

## Глава 15

### ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ ВОДООХРАННЫХ МЕРОПРИЯТИЙ

Экономическую эффективность водоохранных мероприятий  $\mathcal{E}$  вычисляют как сумму прямого  $\mathcal{E}_п$  и косвенного  $\mathcal{E}_к$  эффектов:

$$\mathcal{E} = \mathcal{E}_п + \mathcal{E}_к. \quad (204)$$

Прямой экономический эффект от водоохранных мероприятий

$$\mathcal{E}_п = Y - Z, \quad (205)$$

где  $Y$  — предотвращенный или уменьшенный в результате проведения водоохранных мероприятия или комплекса мероприятий ущерб, наносимый народному хозяйству загрязнением водного источника, млн р.;  $Z$  — расчетные затраты на водоохранные мероприятия или комплекс мероприятий, млн р.

Общий ущерб, наносимый народному хозяйству загрязнением источников воды,

$$Y_{об} = \sum_{i=1}^n Y_i, \quad (206)$$

где  $n$  — число потребителей воды или объектов природы, терпящих ущерб от загрязнения воды;  $Y_i$  — ущербы, наносимые отдельным водопотребителям, приведены ниже.

## Определение отдельных видов ущерба.

1. Затраты на дополнительную подготовку воды от уровня фактического загрязнения до предельно допустимых концентраций загрязнения ПДК

$$Y_{пв} = \sum_{i=1}^n (Z_{2i} - Z_{1i}) V_i, \quad (207)$$

где  $n$  — число потребителей воды, организующих дополнительную водоподготовку;  $Z_{2i}$  — расчетные затраты  $i$ -го потребителя на подготовку воды при загрязненном водоеме;  $Z_{1i}$  — расчетные затраты  $i$ -го потребителя воды при незагрязненном водоеме;  $V_i$  — объем потребляемой воды.

## 2. Затраты на восстановление качества воды

$$Y_{кв} = \sum_{i=1}^n Z_i, \quad (208)$$

где  $n$  — число мероприятий по восстановлению качества водных источников;  $Z_i$  — приведенные расчетные затраты по  $i$ -му мероприятию для восстановления качества водных источников до их первоначального (до загрязнения) состояния.

3. Затраты на компенсацию ущерба от снижения продуктивности в сельском, рыбном и лесном хозяйстве

$$Y_{пр} = [(C_2 - C_1) + \epsilon_n(K_2 - K_1)] V, \quad (209)$$

где  $C_1$  — себестоимость единицы продукции при использовании незагрязненной воды;  $C_2$  — то же загрязненной воды;  $K_1$  — удельные (на единицу продукции) капитальные вложения в хозяйство при использовании незагрязненной воды;  $K_2$  — то же загрязненной воды;  $\epsilon_n$  — нормативный коэффициент сравнительной экономической эффективности;  $V$  — планируемый годовой объем продукции.

В отдельных отраслях ущерба определяют, исходя из следующих соображений.

В промышленности и коммунально-бытовом водоснабжении не допускается потребление воды, качество которой не соответствует установленным требованиям. Поэтому в водоснабжении ущерб связан с затратами на строительство и расширение сооружений по водоподготовке, перенос водозабора, освоение новых источников для водоснабжения.

В сельском и рыбном хозяйстве ущерб от загрязнения водных источников — затраты на восстановление качества воды или компенсацию потерь продукции при использовании загрязненной воды.

Ущерб, наносимый населению в результате загрязнения воды, равен затратам на ликвидацию последствий загрязнения: на медицинское обслуживание в связи с увеличением заболеваемости населения, на перенос мест массового отдыха, на мероприятия по оздоровлению рек и т. д.

Ущерб окружающей природной среде составляют затраты на восстановление прежнего состояния природы или компенсацию потерь продукции (например, при гибели лесов).

Затраты на водоохранные мероприятия можно разделить на затраты по предотвращению образования сточных вод либо по предотвращению их поступления в водоем, на очистку сточных вод и водоемов от загрязнения.

К первой группе относятся затраты на внедрение маловодных и безводных технологий получения продукции, прогрессивных систем водоснабжения, например оборотного водоснабжения в промышленности. К этой же группе можно отнести затраты по уничтожению стоков (выпариванию и сжиганию), по закачке сточных вод в водонепроницаемые пласты или их использованию для закачки в нефтеносные пласты.

К второй группе относятся затраты на очистку сточных вод и их разбавление до сброса в водоемы. Сюда же можно включить затраты на использование коммунальных, животноводческих и некоторых видов промышленных сточных вод для орошения, так как при этом проводится их биологическая очистка.

К третьей группе относятся затраты на оздоровление водоемов: очистку водной поверхности от мусора, аэрацию воды; ускорение процессов самоочищения (использование растений и животных, поглощающих загрязняющие вещества); мероприятия, снижающие концентрацию биогенных веществ, например путем проведения попусков воды из верхнего бьефа и т. д.

Кроме прямого эффекта от проведения водоохранных мероприятий можно учитывать и косвенный эффект  $\mathcal{E}_k$ , заключающийся в получении дополнительной продукции в результате извлечения ценных веществ из сточных вод,  $\mathcal{E}_k = \mathcal{E}_c + \mathcal{Z}$ ,

где  $\mathcal{E}_c$  — эффект, получаемый в результате извлечения ценных веществ из сточных вод;  $\mathcal{Z}$  — экономия затрат, которые необходимо было бы вложить в народное хозяйство для получения дополнительной продукции.

При этом необходимо учитывать затраты, связанные с извлечением ценных веществ.

Пример экономии затрат — полив сточными водами сельскохозяйственных полей орошения, повышающий урожай сельскохозяйственных культур. При этом экономятся средства на получение дополнительной сельскохозяйственной продукции. При подсчете косвенного эффекта в этом примере  $\mathcal{E}_c = 0$ .

Если имеется несколько вариантов инженерных решений, то принимают тот, который обеспечивает наибольший экономический эффект  $\mathcal{E}$ . Во всех случаях необходимо рассматривать варианты, удовлетворяющие условию  $\mathcal{E} \geq 0$ .

### Контрольные вопросы и задания

1. Подумайте, как связаны между собой время наполнения водохранилища и срок замораживания капитальных вложений на его строительство?
2. Почему назрела необходимость введения платы за экологические ресурсы (в том числе и за воду)?
3. Как поступить в случае, если экологическая эффективность водоохранных мероприятий неочевидна?

## ЛИТЕРАТУРА

- Авакян А. Б., Салтанкин В. П., Шарапов В. А. Водохранилища. — М.: Мысль, 1987. — 325 с.
- Бородавченко И. П., Лозановский И. Н., Орлов Д. С., Михура В. И. Комплексное использование и охрана водных ресурсов. — М.: Колос, 1983. — 175 с.
- Бусалаев И. В. Сложные водохозяйственные системы. — Алма-Ата: Наука, 1980. — 229 с.
- Великанов А. А., Коробова Д. Н., Пойзнер В. И. Моделирование процессов функционирования водохозяйственных систем. — М.: Наука, 1983. — 105 с.
- Вендров С. Л. Проблемы преобразования речных систем. — Л.: Гидрометеоздат, 1979. — 208 с.
- Вендров С. Л. Водохранилища и их воздействие на окружающую среду. — М.: Наука, 1986.
- Водоохранилища и водооградительные сооружения ГАЭС, ТЭС и АЭС / Под ред. Т. П. Доценко. — М.: Энергоатомиздат, 1989. — 191 с.
- Воропаев Г. В., Исмаилов Г. Х., Федоров В. М. Моделирование водохозяйственных систем аридной зоны. — М.: Наука, 1984. — 342 с.
- Гидроэлектрические станции / Под ред. В. Я. Карелина, Г. И. Кривченко. — М.: Энергоатомиздат, 1987. — 464 с.
- Гидроэнергетика / Под ред. В. И. Обрезкова. — М.: Энергоатомиздат, 1988. — 512 с.
- Гидроэнергетические установки / Под ред. Д. С. Щавелева. — Л.: Энергоиздат, 1981. — 517 с.
- Елаховский С. Б. Гидроэлектростанции в водохозяйственных системах. — М.: Энергия, 1979. — 185 с.
- Ильиных И. И. Гидроэлектростанции. — М.: Энергоатомиздат, 1988. — 247 с.
- Исаев А. И., Карпова Е. И. Рыбное хозяйство водохранилищ. — М.: Агропромиздат, 1989. — 255 с.
- Карелин В. Я., Волшаник В. В. Сооружения и оборудования малых гидростанций. — М.: Энергоатомиздат, 1986. — 199 с.
- Крицкий С. Н., Менкель М. Ф. Водохозяйственные расчеты. — Л.: Гидрометеоздат, 1952. — 392 с.
- Лауке Д., Стединжер Дж., Хейт Д. Планирование и анализ водохозяйственных систем. — М.: Энергоатомиздат, 1984. — 400 с.
- Малая гидроэнергетика / Под ред. Л. П. Михайлова. — М.: Энергоатомиздат, 1989. — 180 с.
- Маслов Б. С., Минаев И. В. Мелиорация и охрана природы. — М.: Россельхозиздат, 1985. — 270 с.
- Математические модели глобального развития. — Л.: Гидрометеоздат, 1980. — с. 37...58.
- Межзональное перераспределение водных ресурсов / Под ред. А. А. Соколова и И. А. Шикломанова. — Л.: Гидрометеоздат, 1980. — 375 с.
- Методы системного анализа в мелиорации и водном хозяйстве / Под ред. чл.-кор. ВАСХНИЛ Б. Г. Шпепы. — Л.: Гидрометеоздат, 1983. — 258 с.
- Мировой водный баланс и водные ресурсы Земли. — Л.: Гидрометеоздат, 1974. — 637 с.
- Население мира. Демографический справочник. — М.: Мысль, 1989.
- Непорожный П. С., Обрезков В. И. Гидроэнергетика. — М.: Энергоиздат, 1982. — 303 с.
- Павлов Д. С., Пахоруков А. М. Биологические основы защиты рыб от попадания в водозаборные сооружения. — М.: Легкая и пищевая промышленность, 1982. — 264 с.
- Покатная миграция молоди рыб в реках Волге и Или / Под ред. Б. П. Мантейфеля. — М.: Наука, 1981. — 320 с.

- Пряжинская В. Г. Математическое моделирование в водном хозяйстве. — М.: Наука, 1988. — 112 с.
- Рамад Ф. Основы прикладной экологии. — Л.: Гидрометеоздат, 1981. — 540 с.
- Реймерс Н. Д. Азбука природы. — М.: Знание, 1982. — 206 с.
- Резниковский А. Ш., Рубинштейн М. И. Диспетчерские правила управления режимами водохранилищ. — М.: Энергоиздат, 1984. — 105 с.
- Справочник. Мелиорация и водное хозяйство. Т. 5. Водное хозяйство / Под ред. И. И. Бородавченко. — М.: Агропромиздат, 1988. — 399 с.
- Справочник. Мелиорация и водное хозяйство. Т. 6. Орошение / Под ред. Б. Б. Шумакова. — М.: Агропромиздат, 1990.
- Тютков О. В. Задачи оптимизации рекреационного использования водоемов // Водные ресурсы. 1977. № 5. С. 79...88.
- Федоров В. Д., Гильманов Т. Г. Экология. — М.: Изд-во МГУ, 1980. — 464 с.
- Харитонов Г. А. Лесомелиорация водных угодий. — М.: Лесная промышленность, 1976. — 168 с.
- Шабанов В. В. Биоклиматическое обоснование мелиораций. — Л.: Гидрометеоздат, 1973. — 164 с.
- Шикломанов И. А. Исследование водных ресурсов суши: итоги, проблемы, перспективы. — Л.: Гидрометеоздат, 1988.
- Шикломанов И. А. Влияние хозяйственной деятельности на речной сток. — Л.: Гидрометеоздат, 1989.
- Шикломанов И. А., Маркова О. А. Проблемы водообеспечения и переброски речного стока в мире. — Л.: Гидрометеоздат, 1987.



## ПРЕДМЕТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ

- Атмосфера 240  
Аэрация воды 284...285
- Баланс  
— водный 11...12  
— водохозяйственный 33...43  
Биогенные вещества  
Биогеоценоз 241  
Биосфера 240  
Биохимическое потребление кислорода (БПК) 268
- Вода, органолептические свойства 269...270  
Водное законодательство 30...32  
Водное хозяйство 21...26  
Водные ресурсы 6...16  
Водный кадастр 28...30  
Водоотведение 56, 120  
Водоотдача, гарантированный режим 226  
Водоохранная зона 295...296  
Водопользование 56...57  
Водопотребление 55, 56, 120  
Водородный показатель pH 269  
Водоснабжение  
— коммунально-бытовое 60...64  
— промышленное 116...124  
— сельскохозяйственное 140...142  
Водоросли синезеленые 274, 281...282  
Водохозяйственный баланс (ВХБ) 33...43  
Водохозяйственный комплекс (ВХК) 54, 57...59  
Возвратные воды 40
- Гидравлическая турбина  
Гидравлическая турбина  
— активная 89  
— реактивная 89  
Гидросфера 240  
Гидроэлектростанции  
— деривационные 82  
— плотинные 81  
— русловые 82, 97  
Гидроэнергетический потенциал 79  
— валовой 79  
— технический 79  
— экономический 80  
График  
— диспетчерский 227...235  
— нагрузки энергосистемы 85...86

Деривация 82...84  
Деструкторы 242

Загрязнение 268, 275...277  
Засорение 268  
Затраты ВХК  
— комплексные 186...191  
— общие 186  
— отраслевые 186...191

Емкость водохранилища 224

Истощение воды 50, 285...291

Комплексный гидроузел 96, 219...227  
Консументы 241  
Коэффициент  
— обратного водоснабжения 121, 47  
— полезного действия агрегата 95  
— сравнительной экономической эффективности 181, 188

Лесосплав  
— кошельный 139  
— молевой 139  
— плотовый 139  
Литосфера 240

Мероприятия по охране природы

— активные 239  
— предупредительные 239

Методы

— достижения компромисса в многокритериальных задачах 171...178  
— принятия решения при комплексном использовании 7  
— водных ресурсов 6...11  
— расчета регулирования стока 51...52

Мелиорации

— гидротехнические 279  
— комплексные 70...72  
— лесные 279  
— оросительные 64...72  
— осушительные 72...76

Мобильная плавучая установка 131

Напор 81, 90, 92

Обводнение 140...142

Очистка

— механическая 277...278  
— химическая 277...278  
— биохимическая 277...278

Пищевая цепь 241

Попуски

- водоснабженческие 41
- навигационные 41
- природоохранные 42
- рыбохозяйственные 41
- санитарные 41
- сельскохозяйственные 41
- энергетические 41

Потери

- на испарение 44
- на фильтрацию 44

Предельно допустимые концентрации (ПДК) 268

Природопользование 251...254

Продуценты 241

Рекреация 142...146

Ресурсы

- возобновимые 240
- невозобновимые 240

Рыбозащитные сооружения 134, 135

Рыбоподъемники 127...132

Рыбоходы 127...132

Самоочищение природных вод 282

Система

- водотранспортная 136...140
- водооборотная 74...76
- водоснабжения 46
- водохозяйственная 152...157
- имитационная 166...168
- сложная 6

Скат рыб 133...136

Сохранение почв 253

Стоки

- животноводческие 273
- коммунальные 272
- промышленные 271

Эвтрофирование 262...263

Экология 5...6, 242...250

Экологический прогноз 250...251

Экологическая упругость 244...250

Электроэнергетическая система 85

## ОГЛАВЛЕНИЕ

|   |           |
|---|-----------|
| Введение (В. В. Шабанов) .....  | 3         |
| <b>КОМПЛЕКСНОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ВОДНЫХ РЕСУРСОВ .....</b>  | <b>17</b> |
| <b>Глава 1. Планирование использования водных ресурсов (В. В. Шабанов)</b> .....              | <b>17</b> |
| 1. Водобеспечение народного хозяйства .....   | 17        |
| 1.1. Зависимости, описывающие тенденции изменения прогнозных показателей .....                | 19        |
| 1.2. Граф целей и задач на уровне страны, приведенный к решению проблемы водобеспечения ..... | 21        |
| 2. Водное хозяйство и водное законодательство (Н. Ф. Юрченко) .....                           | 21        |
| 2.1. Водное хозяйство и его функции .....   | 21        |
| 2.2. Государственное управление водным хозяйством в России .....                              | 26        |
| 2.3. Государственный учет вод. Водный кадастр .....   | 28        |
| 2.4. Водное законодательство России .....   | 30        |
| <b>Глава 2. Водохозяйственные балансы (ВХБ) .....</b>   | <b>33</b> |
| 3. Назначение и виды ВХБ (В. В. Шабанов) .....  | 33        |
| 4. Уравнение ВХБ (В. В. Шабанов) .....  | 33        |
| 4.1. Приходная часть ВХБ (И. Г. Галямина) .....   | 36        |
| 4.2. Расходная часть ВХБ (И. Г. Галямина) .....   | 40        |
| 4.3. Перспективный ВХБ (В. В. Шабанов) .....  | 43        |
| 5. Причины дефицита водных ресурсов в отдельных регионах (И. Г. Галямина) .....               | 43        |
| 6. Пути преодоления дефицита водных ресурсов .....  | 45        |
| 6.1. Внедрение прогрессивных технологий (И. Г. Галямина) .....                                | 45        |
| 6.2. Применение прогрессивных систем водоснабжения (И. Г. Галямина) .....                     | 46        |
| 6.3. Уменьшение непроизводительных потерь воды (И. Г. Галямина) .....                         | 48        |
| 6.4. Оптимальное размещение водоемких производств (И. Г. Галямина) .....                      | 49        |
| 6.5. Защита водных ресурсов от истощения (И. Г. Галямина) .....                               | 50        |
| 6.6. Использование вод повышенной минерализации и морских (И. Г. Галямина) .....              | 50        |
| 6.7. Регулирование стока (И. Г. Галямина) .....   | 51        |
| 6.8. Территориальное перераспределение стока (В. В. Шабанов) .....                            | 52        |
| 6.9. Использование вековых запасов воды (И. Г. Галямина) .....                                | 53        |
| <b>Глава 3. Водохозяйственные комплексы (ВХК) .....</b>                                       | <b>54</b> |
| 7. Водопотребители и водопользователи ВХК (В. В. Шабанов) .....                               | 55        |
| 8. Классификация ВХК (В. В. Шабанов) .....  | 57        |
| 9. Основные участники ВХК. Их требования к водным ресурсам и режиму водисточников .....       | 60        |
| 9.1. Коммунально-бытовое хозяйство (И. Г. Галямина) .....                                     | 60        |
| 9.2. Оросительные мелиорации (В. В. Шабанов) .....  | 64        |
| 9.3. Осушительные мелиорации (В. В. Шабанов) .....  | 72        |
| 9.4. Энергетика (Э. С. Беглярова) .....   | 76        |
| 9.4.1. ГЭС и комплексное использование водных ресурсов .....                                  | 77        |
| 9.4.2. Гидроэнергетические ресурсы .....  | 79        |
| 9.4.3. Использование водной энергии .....   | 80        |
| 9.4.4. Каскады ГЭС и водохранилищ .....   | 84        |
| 9.4.5. Потребители электрической энергии и энергетические системы .....                       | 85        |
| 9.4.6. Гидросиловое оборудование .....  | 88        |

|              |  |            |
|--------------|--|------------|
| 9.4.7.       | Компоновки ГЭС в комплексном гидроузле .....   | 96         |
| 9.4.8.       | Здания ГЭС .....   | 99         |
| 9.4.9.       | Гидроаккумулирующие электростанции .....   | 107        |
| 9.4.10.      | Требования гидроэнергетики к качеству воды .....   | 115        |
| 9.4.11.      | Пути экономии водных ресурсов в гидроэнергетике .....  | 116        |
| 9.5.         | Промышленность (И. Г. Галаямина) .....   | 116        |
| 9.6.         | Рыбное хозяйство (Э. С. Беглярова) .....   | 125        |
| 9.7.         | Водный транспорт (И. Г. Галаямина) .....   | 136        |
| 9.8.         | Лесосплав. Требования к водным объектам. Влияние на участников ВХК и окружающую среду (И. Г. Галаямина) .....  | 139        |
| 9.9.         | Сельскохозяйственное водоснабжение и обводнение (В. В. Шабанов) .....  | 140        |
| 9.10.        | Рекреация (И. Г. Галаямина) .....  | 142        |
| 9.11.        | Природоохранные объекты как участники ВХК (В. В. Шабанов) .....  | 146        |
| 9.11.1.      | Допустимые нагрузки на водную экосистему .....   | 148        |
| <b>Глава</b> | <b>4. Управление водохозяйственными системами (И. Г. Галаямина) .....</b>                                      | <b>152</b> |
| 10.          | Задачи, решаемые при управлении ВХС .....  | 154        |
| 11.          | Основные понятия и принципы управления большими ВХС .....  | 156        |
| 12.          | Математическое моделирование .....   | 157        |
| 13.          | Построение математических моделей управления ВХС .....   | 169        |
| 14.          | Учет неопределенностей при управлении ВХС .....  | 170        |
| <b>Глава</b> | <b>5. Формирование структуры ВХС (И. Г. Галаямина) .....</b>   | <b>178</b> |
| 15.          | Состав задач, решаемых при формировании структуры .....  | 178        |
| 16.          | Размещение водоемких производств .....   | 180        |
| 17.          | Определение состава участников ВХК .....   | 181        |
| 17.1.        | Методика решения задачи .....  | 181        |
| 17.2.        | Распределение затрат ВХК между его участниками .....   | 186        |
| 17.3.        | Применение метода сравнительной экономической эффективности для выбора параметров комплексного гидроузла ..... | 191        |
| 18.          | Оптимизация распределения воды между участниками ВХК .....   | 192        |
| 18.1.        | Постановка задачи .....  | 192        |
| 18.2.        | Выбор заменяемых (альтернативных) вариантов .....  | 195        |
| 18.3.        | Одноцелевая оптимизация использования воды участниками ВХК .....   | 197        |
| 18.4.        | Производственные функции участников ВХК .....  | 199        |
| 19.          | Схема расчетов по обоснованию развития ВХС .....   | 213        |
| 20.          | Информационное обеспечение задач управления ВХС .....  | 215        |
| <b>Глава</b> | <b>6. Комплексные гидроузлы (И. Г. Галаямина) .....</b>  | <b>219</b> |
| 21.          | Основные понятия и определения .....   | 219        |
| 22.          | Основные параметры комплексных гидроузлов .....  | 221        |
| 23.          | Управление режимом работы комплексных гидроузлов .....   | 225        |
| 23.1.        | Основные показатели режима работы комплексного гидроузла .....   | 225        |
| 23.2.        | Диспетчерское управление работой водохранилищ .....  | 227        |
| 23.3.        | Построение элементов диспетчерского графика .....  | 229        |
| 23.4.        | Основные положения правил использования водных ресурсов водохранилища .....                                    | 225        |
| 24.          | Эксплуатация комплексных гидроузлов в зимний период (Н. Ф. Юрченко) .....                                      | 236        |

## **ОХРАНА ПРИРОДЫ**

|              |  |            |
|--------------|--|------------|
| <b>Глава</b> | <b>7. Основные задачи и понятия охраны природы (В. В. Шабанов) .....</b> | <b>239</b> |
| 25.          | Природные ресурсы .....  | 239        |
| 316          |  |            |

|              |  |            |
|--------------|--|------------|
| 26.          | Биосфера (основные понятия) .....  | 240        |
| 27.          | Прикладная экология .....  | 242        |
| 28.          | Соотношение основных прогнозируемых параметров экосистем .....   | 244        |
| 29.          | Экологический прогноз .....  | 250        |
| 30.          | Рациональное природопользование .....  | 251        |
| 30.1.        | Возможные экологические конфликты .....  | 251        |
| 30.2.        | Экологизация производства .....  | 252        |
| 30.3.        | Специфические черты технологии экологизированного производства .....   | 254        |
| <b>Глава</b> | <b>8. Мелиорация и охрана природы (В. В. Шабанов) .....</b>  | <b>255</b> |
| 31.          | Влияние мелиорации на природу .....  | 255        |
| 32.          | Зоны влияния мелиоративных систем на природную среду .....   | 258        |
| 33.          | Прогноз изменения условий внешней среды под влиянием мелиорации .....  | 260        |
| 33.1.        | Изменение уровня грунтовых вод .....   | 260        |
| 33.2.        | Загрязнение поверхностных вод дренажным стоком .....   | 260        |
| <b>Глава</b> | <b>9. Защита озер и водохранилищ от эвтрофирования дренажным стоком с осушаемых земель (В. В. Шабанов) .....</b> | <b>262</b> |
| 34.          | Основные рассредоточенные источники эвтрофирования в гумидной зоне .....   | 263        |
| 35.          | Методы борьбы с эвтрофированием водоемов в гумидной зоне .....   | 266        |
| <b>Глава</b> | <b>10. Охрана водных ресурсов от загрязнения и засорения (Э. С. Беглярова) .....</b>                             | <b>268</b> |
| 36.          | Основные понятия и показатели состояния вод .....  | 268        |
| 37.          | Современное состояние природных вод .....  | 270        |
| 38.          | Основные источники загрязнения природных вод .....   | 271        |
| 39.          | Мероприятия по охране и восстановлению чистоты водоемов .....  | 277        |
| 39.1.        | Способы очистки промышленных и коммунальных стоков .....   | 277        |
| 39.2.        | Охрана вод от загрязнения удобрениями и пестицидами .....  | 278        |
| 39.3.        | Использование стоков животноводческих комплексов .....   | 279        |
| 39.4.        | Защита вод от загрязнения синезелеными водорослями .....   | 280        |
| 39.5.        | Меры, предупреждающие ухудшение качества вод другими источниками загрязнений .....                               | 281        |
| 39.6.        | Самоочищение природных вод и его интенсификация .....  | 282        |
| 39.7.        | Искусственная аэрация как эффективный способ интенсификации самоочищения воды .....                              | 284        |
| <b>Глава</b> | <b>11. Охрана вод от истощения (И. Г. Галымина) .....</b>  | <b>285</b> |
| 40.          | Факторы, влияющие на водность источника .....  | 285        |
| 41.          | Причины истощения водных ресурсов .....  | 286        |
| 42.          | Мероприятия по предотвращению истощения водных источников .....  | 288        |
| <b>Глава</b> | <b>12. Использование водных ресурсов малых водосборов (В. В. Шабанов) .....</b>                                  | <b>292</b> |
| 43.          | Влияние естественных условий водосборной площади на использование водных ресурсов малых рек .....                | 292        |
| 44.          | Изменение социально-экономических условий на водосборах малых рек .....  | 292        |
| 45.          | Рациональное использование водных ресурсов и развитие речного бассейна .....                                     | 293        |

|                      |  |     |
|----------------------|--|-----|
| 46.                  | Оптимизация использования водных ресурсов при социально-экономической деятельности ..... | 296 |
| Глава                | 13. Влияние ГЭС на окружающую среду (Э. С. Беглярова) .....                              | 297 |
| Глава                | 14. Компенсация ущербов при создании ВХК (И. Г. Гальямина) .....                         | 303 |
| Глава                | 15. Экономическая эффективность водоохранных мероприятий (И. Г. Гальямина) .....         | 307 |
| Литература           | .....  | 310 |
| Предметный указатель | .....  | 312 |

Учебное издание

Шабанов Виталий Владимирович  
Гальямина Ирина Геннадьевна  
Беглярова Эвелина Суреновна и др.

**КОМПЛЕКСНОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ВОДНЫХ РЕСУРСОВ  
И ОХРАНА ПРИРОДЫ**

Учебник для вузов

Художественный редактор *А. В. Петров*  
Технический редактор *И. Г. Гоголевская*  
Корректор *Т. Т. Талдыкина*

ИБ № 6633

Лицензия № 010159 от 04.01.92 г.

Сдано в набор 28.04.93. Подписано к печати 17.12.93. Формат 60 × 88<sup>1</sup>/<sub>16</sub>.  
Бумага кн.-журн. Гарнитура Пресс-Роман. Печать офсетная. Усл. печ. л. 19,60.  
Усл. кр.-отт. 19,85. Уч.-изд. л. 21,81. Изд. № 013. Тираж 1000 экз. Заказ № 28  
"С" № 017.

Ордена Трудового Красного Знамени издательство "Колос", 107807, ГСП-6,  
Москва, Б-78, ул. Садовая-Спасская, 18.

Московская типография № 9 Министерства печати и информации Российской  
Федерации. 109033, Москва, Волочаевская, 40.

---

В 1994 году

**ВЫЙДЕТ В СВЕТ УЧЕБНОЕ ПОСОБИЕ ДЛЯ ВУЗОВ:**

**Н. В. Оводова. Расчеты проектирования сельскохозяйственного водоснабжения и обводнения. — М.: Колос, 1994.**

Приведены расчеты сооружений по реагентной, безреагентной и малоотходной технологиям очистки природной воды. Даны примеры расчетов разводящей сети и выбора экономически наиболее выгодной системы водоснабжения. Изложены методики лабораторных работ.

Для студентов, обучающихся по специальности "Водное хозяйство и мелиорация".



---

В 1994 году

**ВЫЙДЕТ В СВЕТ УЧЕБНИК ДЛЯ ВУЗОВ:**

А. Д. Гумбаров, А. С. Луговой, А. В. Сербинсв.  
**Оросительные рисовые системы. – М.: Колос, 1994.**

Рассмотрены особенности рисовых оросительных систем. Дан расчет режима орошения риса и конструкции рисовых систем. Приведены способы водораспределения, организация и эксплуатация рисовых систем.

Для студентов, обучающихся по специальности "Водное хозяйство и мелиорация".