СПРАВОЧНИК

мелиорация
и водное
хозяйство

СООРУЖЕНИЯ

СПРАВОЧНИК

мелиорация и водное хозяйство

4

СООРУЖЕНИЯ

Под редакцией **П. А. Полад-заде**

Москва ВО «Агропромиздат» 1987

ББК 38.778
М47
УДК 626.8(031)

Н. Н. Кременецкий, И. С. Румянцев, Б. В. Орлов, П. Е. Лысенко, И. С. Лапидовская, Г. М. Каганов, Д. В. Штеренлихт, В. Ф. Чебаевский, В. Ф. Мацея, Ц. Е. Мирцхулава, А. М. Силкин, Г. Е. Фомин, А. Л. Половец, Д. С. Бегляров, А. А. Никольская, Р. К. Кромер, С. Н. Корюкин, П. А. Полад-заде, Ю. М. Косиченко, Г. А. Тер-Абрамянц, В. С. Алтунин, Х. Ш. Шапиро, В. И. Тевзадзе.

Главная редакционная коллегия: *Н. Ф. Васильев* (главный редактор), *П. А. Полад-заде* (заместитель главного редактора), *И. И. Бородавченко* (заместитель главного редактора), *В. Ф. Моховиков, Л. С. Литвак, Б. С. Маслов, Л. Г. Балаев, Б. Б. Шумаков, В. П. Орлова* (ответственный секретарь).

Редакционная коллегия справочника «Мелиорация и водное хозяйство. 4. Сооружения»: *П. А. Полад-заде* (главный редактор), *Н. Н. Кременецкий, К. Ф. Артамонов, Н. С. Гришенко, Ц. Е. Мирцхулава, Б. В. Орлов, И. С. Румянцев, Д. В. Штеренлихт.*

Составители: *Н. Н. Кременецкий, И. С. Лапидовская.*

Мелиорация и водное хозяйство. 4. Сооружения: М 47 Справочник/Под ред. П. А. Полад-заде. — М.: Агропромиздат, 1987. — 464 с.: ил.

Систематизирован справочный материал по назначению, условиям применения, расчетам, техническим и конструктивным особенностям гидротехнических сооружений на мелиоративных системах. Описаны общие положения проектирования сооружений. Рассмотрены гидроузлы мелиоративного назначения, плотины, водосбросные сооружения, каналы, трубопроводы и насосные станции. Даны типовые конструкции сооружений на мелиоративной сети и их механического оборудования.

М $\frac{3802030000-414}{035(01)-87}$ 139—87

ББК 38.778

© ВО «Агропромиздат», 1987

Основные буквенные обозначения и сокращения

Расчетные значения произвольной величины X употребляют без индекса; средние значения обозначают X_m; нормативные — X_n; предельные — X_{lim}; допускаемые — X_{adm}; наибольшие — X_{max}; наименьшие — X_{min}; наблюдаемые — X_{obs}; критические — X_{cr}.

a — расстояние, размер, ускорение линейное
A — площадь
b — ширина; ширина канала по дну
B — ширина канала по урезу воды
c — сцепление удельное
C — коэффициент Шези
C_c — теплоемкость удельная
C_U — степень неоднородности зернового состава грунта
d — глубина, диаметр
d_w — глубина расположения уровня подземных вод
e — коэффициент пористости, эксцентриситет силы
E — модуль упругости, сейсмическое воздействие, энергия
f — частота колебания
E_b — модуль упругости бетона
F — сила, нагрузка
F_h, F_v — горизонтальная и вертикальная составляющие силы
g — ускорение свободного падения
G_g — нагрузка постоянная (то же распределенная), вес
h — высота, глубина воды
h_{cr} — критическая глубина потока воды
H — напор, падение напора
i — уклон, уклон свободной поверхности потока
i_{cr} — критический уклон
I_C — показатель консистенции
I_L — показатель текучести
I_P — число пластичности
k — коэффициент фильтрации
l, L — длина, пролет
m — масса; заложение откоса; коэффициент расхода водослива
n — коэффициент шероховатости, пористость, частота вращения
$N(n)$ — сила нормальная (то же на единицу длины)
p — давление
p_a — давление активное
p_p — давление пассивное
P — мощность
$Q(q)$ — расход потока (удельный); сила поперечная (то же на единицу длины)
r — радиус
R — сопротивление
R_c — сопротивление сжатию
R_f — сопротивление изгибу
R_t — сопротивление растяжению
R_b — сопротивление бетона
R_a — сопротивление арматуры
s — шаг; длина пути (кривой); осадка (просадка) основания

S — площадь живого сечения потока; статический момент сечения; усилие
t — время, температура, толщина
T — период колебания; крутящий момент
u — периметр; составляющая перемещения по оси x
v — скорость линейная; скорость потока воды; составляющая перемещения по оси y
v_{adm} — допускаемая скорость потока воды
v_{cr} — критическая скорость
V — объем
w — влажность грунта, составляющая перемещения по оси z
w_L — граница текучести
w_P — граница пластичности (раскатывания)
W — работа
α — угловое ускорение, угол наклона, коэффициент линейного расширения, коэффициент теплоотдачи
β — коэффициент объемного расширения
γ — удельный вес, градиент скорости, угол сдвига
γ_{sw} — удельный вес с учетом взвешивания
γ_c — коэффициент условий работы
γ_g — коэффициент надежности по грунту
γ_f — коэффициент надежности по нагрузке
γ_m — коэффициент надежности по материалу
γ_n — коэффициент надежности по назначению сооружения
ε — коэффициент сужения
η — коэффициент полезного действия; динамическая вязкость
θ — угол поворота
λ — длина волны; коэффициент теплопроводности
μ — коэффициент трения
ν — коэффициент поперечного расширения (Пуассона); кинематическая вязкость
ρ — плотность; плотность грунта, кривизна
ρ_b — плотность бетона
ρ_d — плотность твердых частиц
ρ_s — плотность наносов; плотность сухого грунта
ρ_w — плотность воды
σ — нормальное напряжение
τ — касательное напряжение
φ — угол внутреннего трения грунта, угол естественного откоса, коэффициент скорости вытекания, угловой путь
ω — угловая скорость; угловая частота

Сокращения, принятые в справочнике

ВБ — верхний бьеф
НБ — нижний бьеф
НПУ — нормальный подпорный уровень
ФПУ — форсированный подпорный уровень
УГВ — уровень грунтовых вод
УНВ — уровень напорных вод
ГЭС — гидроэлектростанция
КПД — коэффициент полезного действия
ПВХ — поливинилхлорид
НС — насосная станция

Предисловие

Курс партии на ускорение социально-экономического развития страны требует повышения эффективности производства на основе научно-технического прогресса, мобилизации организационно-экономических и социальных факторов, интенсивных методов работы.

Ускорение научно-технического прогресса в мелиорации земель во многом определяется техническим состоянием гидротехнических сооружений, обеспечивающих надежное функционирование мелиоративных систем.

Широкая программа по реконструкции действующих систем наряду со строительством новых, намеченная Основными направлениями экономического и социального развития СССР на 1986—1990 годы и на период до 2000 года, потребовала дальнейшего совершенствования конструкций сооружений. Эта задача должна быть направлена на внедрение в производство экономичных решений, новых прогрессивных материалов, на максимальную индустриализацию строительства, ресурсосберегающие технологии.

Важнейший элемент нового подхода к конструкциям сооружений — это автоматизация систем, обеспечивающая рациональное и надежное водораспределение, ликвидацию холостых сбросов и сокращение потерь воды, точность учета расхода на регулирующих сооружениях. Необходимо совершенствование конструкций сооружений, исходя из требований современных типовых мелиоративных систем, передовой техники полива и эффективных методов осушения, надежности и долговечности работы сооружений. Предстоит шире использовать вычислительную и микропроцессорную технику для управления работой систем и отдельных сооружений, эффективного поливного и гидросилового оборудования, что позволит создать технически совершенные мелиоративные сооружения и реализовать основное назначение реконструкции — повышение эксплуатационных и технико-экономических показателей сооружений с целью увеличения водообеспеченности оросительных систем, улучшения режима грунтовых вод на орошаемых или осушаемых массивах и прилегающих к ним территориях, вдоль трасс магистральных и крупных межхозяйственных каналов, улучшения экологических условий зоны влияния гидроузлов.

При проектировании новых и реконструкции действующих сооружений особую важность приобретают мероприятия по охране окружающей природной среды, которые должны носить комплексный характер с учетом прогноза ее изменения в связи с созданием сооружения. Необходимо учитывать водохозяйственный прогноз изменения гидрологического, в том числе ледового и термического, режима рек в ВБ и НБ; заиление наносами и переформирование русла и берегов рек, водохранилищ и морей; затопление и подтопление территорий и инженерную защиту расположенных на них зданий и соору-

жений; изменение условий судоходства, лесосплава, рыбного хозяйства, водоснабжения и работы существующих мелиоративных систем. Работа сооружений не должна нарушать установленного режима природопользования (сельскохозяйственные угодья, заповедники и т. п.) и условий быта и отдыха населения.

Сведения по назначению, условиям применения гидротехнических сооружений, используемых в мелиорации с учетом последних достижений науки и передовой практики; основы расчетов сооружений найдут широкое применение в практике проектирования, строительства и эксплуатации мелиоративных систем.

Рекомендации справочника даны в соответствии с действующими Строительными нормами и правилами, Государственными стандартами и Стандартами СЭВ, введенными в действие в СССР.

П. А. Полад-заде

Глава 1 ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ МЕЛИОРАТИВНЫХ ГИДРОТЕХНИЧЕСКИХ СООРУЖЕНИЙ

1.1. КЛАССИФИКАЦИЯ СООРУЖЕНИЙ

Гидротехнические сооружения — основные элементы любой мелиоративной системы. С их помощью аккумулируется и подается вода на систему, обеспечивается ее заданный эксплуатационный режим: водораспределение, водорегулирование, отвод излишков воды, сопряжение водоводов различной конструкции и т. д. Конструктивное решение сооружений зависит от: функционального назначения; геологических, гидрологических и климатических условий района строительства, схемы водораспределения; способа строительства, наличия местных строительных материалов и базы стройиндустрии и др.

Классификация мелиоративных гидротехнических сооружений *по функциональному назначению, условиям работы и степени последствий* при отказах показана на рисунке 1.1. *По основному материалу,* используемому для возведения, сооружения подразделяются на грунтовые, каменные, бетонные, стальные, деревянные, из пластмассовых материалов и т. д. *По способу возведения* они могут быть насыпными, намывными, сборными или монолитными, построенными методом направленного взрыва и др.

1.2. КЛАССЫ СООРУЖЕНИЙ

Постоянные гидротехнические сооружения делят на четыре класса, устанавливаемые с учетом возможных аварий или нарушения режима эксплуатации, принимая во внимание: наличие в НБ населенных пунктов, предприятий и объектов народного хозяйства, транспортных магистралей, максимальную высоту водоподпорных сооружений и объем водохранилища, геологическое строение основания, сейсмичность, топографию района строительства водохозяйственного объекта.

Класс водоподпорных сооружений (плотин, дамб) зависит от их высоты, типа основания и последствий аварии, а также от последствий нарушения режима их эксплуатации (табл. 1.1); для основных водоподпорных сооружений принимают более высокий класс. Класс сетевых сооружений зависит от площади обслуживаемых ими мелиорируемых земель (табл. 1.2).

Если основные сооружения комплексного гидроузла обеспечивают одновременно функционирование нескольких объектов, относящихся к различным отраслям водного хозяйства (энергетика, речной транспорт, мелиорация, водоснабжение), то их класс устанавливают по объекту наиболее высокого класса.

Класс основных сооружений мелиоративных систем повышают на единицу, если: авария основного сооружения II...IV классов влечет за собой катастрофические последствия для населенных пунктов и предприятий, расположенных ниже сооружения, или может причинить значительный ущерб народному хозяйству, вызвать длительное прекращение или значительное уменьшение подачи воды; на мелиоративной системе имеются населенные пункты и предприятия, затопление или подтопление которых недопустимо.

Класс основных гидротехнических сооружений понижают на единицу, если: сооружения I и II классов не участвуют в создании напорного фронта; ремонт мелиоративных сооружений в процессе эксплуатации не нарушает работы гидроузла; срок службы сооружения мелиоративной системы ограничен десятью годами.

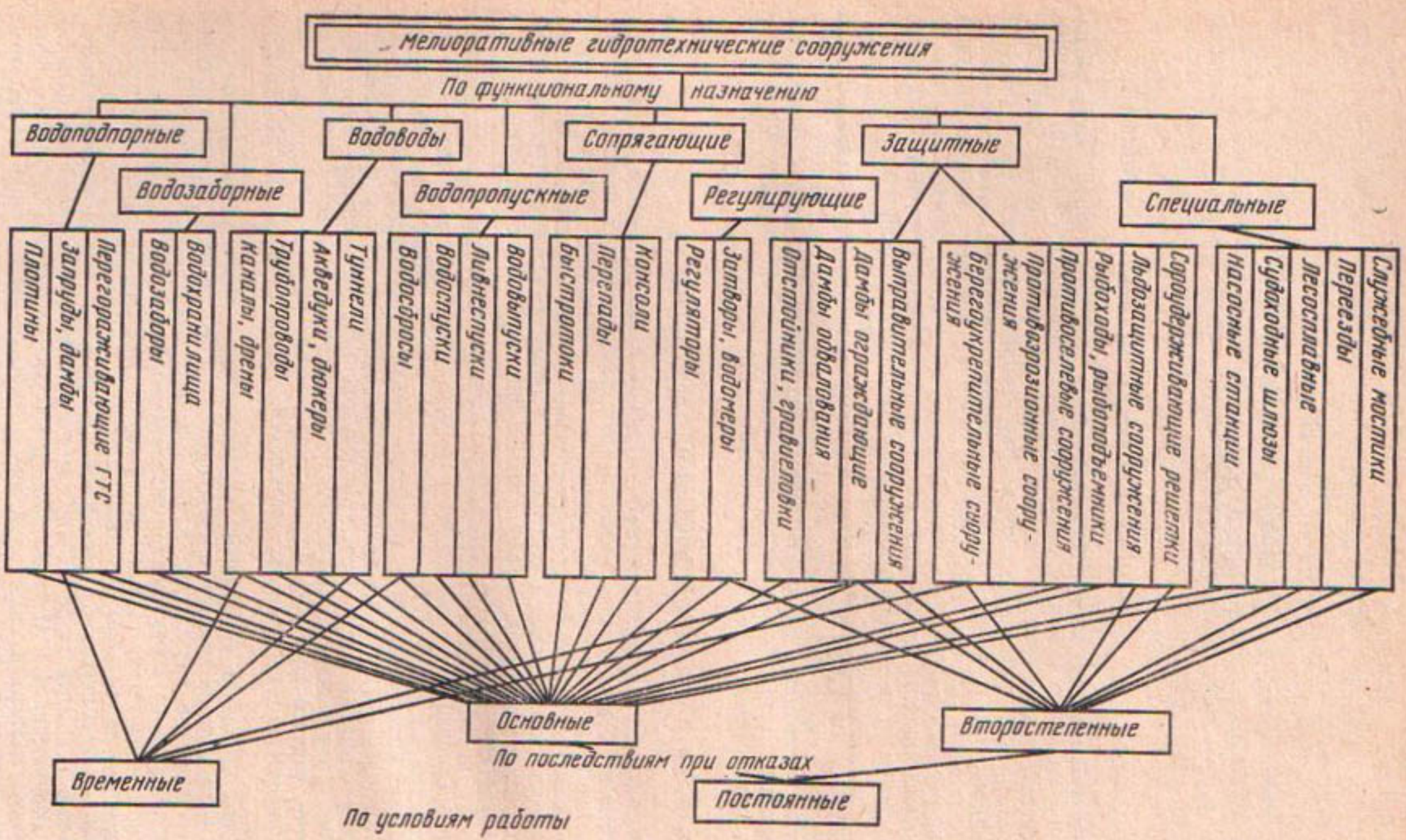


Рис. 1.1. Классификация гидротехнических сооружений по функциональному назначению, условиям работы и степень последствий при отказах

1.1. Классы водоподпорных сооружений

Класс сооружений	Высота сооружения (м) при различных грунтах основания		
	скальные	песчаные, крупнообломочные, глинистые в твердом и полутвердом состоянии	глинистые водонасыщенные в пластическом состоянии
Плотины из грунтовых материалов			
I	100	75	50
II	70...100	35...75	25...50
III	25...70	15...35	15...25
IV	25	15	15
Плотины бетонные и железобетонные, подпорные стенки и другие бетонные сооружения, участвующие в создании напорного фронта			
I	100	50	25
II	60...100	25...50	20...25
III	25...60	10...25	10...20
IV	15	10	10

Примечания. 1. Если в случае аварии водоподпорного сооружения с катастрофическими последствиями для расположенных ниже городов, крупных промышленных предприятий, транспортных магистралей класс его повышают в соответствии с масштабом последствий. 2. Если авария водоподпорного сооружения не вызывает катастрофических последствий в НБ (при расположении гидроузла в необжитом районе или у моря), то класс его допускается понижать на единицу.

1.2. Классы сетевых сооружений мелиоративных систем

Площадь мелиорируемых земель, обслуживаемых сооружением при орошении и осушении, тыс. га	Класс сооружений	
	основных	второстепенных
Более 300	I	II
100...300	II	III
50...100	III	IV
50 и менее	IV	IV

Временные сооружения относятся к IV классу, если их авария может повлечь за собой катастрофические последствия для строительной площадки, населенных пунктов, сооружений и предприятий или вызвать значительную задержку возведения основных сооружений I...III классов. Перемычки и строительные водосбросы при надлежащем обосновании могут быть отнесены к III классу.

1.3. ОСОБЕННОСТИ РАБОТЫ СООРУЖЕНИЙ

Типы гидротехнических сооружений выбирают на основе сравнения технико-экономических показателей разработанных вариантов с учетом всех влияющих факторов.

Общая особенность сооружений — работа в постоянном контакте с движущейся или покоящейся водой, что предопределяет механическое, физико-механическое и биологическое воздействие воды на гидросооружения. *Особенности сетевых сооружений* — нормированное водораспределение на оросительной сети согласно графикам водопользования, своевременный отвод во-

ды на осушительной и сбросной сети, подача воды на осушительно-увлажнительных системах.

Способ водораспределения или водоотведения определяет технологические функции, конструкции, параметры и степень автоматизации сетевых гидротехнических сооружений, а автоматизация этих процессов — гидравлические условия работы сооружений, их конструктивное исполнение и оснастку элементами управления (затворами).

Каскадное регулирование расходов сооружений по уровню НБ обеспечивает пропуск наибольших расходов при нормальных подпорных уровнях воды в бьефах, сооружение работает при повышенных напорах и сниженной пропускной способности. Регулирование водораспределения поддержанием уровня ВБ создает бóльшую стабильность гидравлических условий работы сооружений, но лишает систему преимуществ обратной гидравлической связи, что снижает перспективы использования такого вида регулирования. Сооружения мелиоративных систем двухстороннего действия имеют наиболее сложные условия работы — они должны функционировать как при прямом, так и обратном токе воды.

1.4. РАСЧЕТНЫЕ РАСХОДЫ СООРУЖЕНИЙ

Расчетные расходы постоянных гидротехнических сооружений определяют с учетом ежегодной вероятности их превышения для двух расчетных случаев: основного и поверочного (табл. 1.3).

1.3. Ежегодная вероятность превышения p, %, расчетных максимальных расходов воды в зависимости от класса сооружения

Расчетный случай	I	II	III	IV
Основной	0,1	1,0	3,0	5,0
Поверочный	0,01	0,1	0,5	1,0

Расчетный расход, пропускаемый в период эксплуатации через постоянные сооружения гидроузла, определяют из расчетного максимального расхода реки с учетом его трансформации водохранилищем (действующим или проектируемым).

При *основном расчетном случае* пропуск расхода обеспечивают при НПУ ВБ через полностью открытые отверстия эксплуатационных водосбросов; через все турбины ГЭС; через другие водопропускные сооружения гидроузла.

При *поверочном расчетном случае* пропуск расхода обеспечивают при наивысшем технически и экономически ФПУ всеми водопропускными сооружениями гидроузла; всеми турбинами ГЭС; судоходными, рыбопропускными, водозаборными и другими сооружениями, включая резервные водосбросы. При этом допускается: нарушение нормальной работы водозаборных сооружений, повреждение резервных водосбросов, не приводящее к снижению условий работы основных водосбросов, размыву русла и склонов в НБ гидроузла, не угрожающее разрушением основным сооружениям и устранимое после пропуска паводка.

На реках с каскадным расположением гидроузлов *расчетный максимальный расход водосбросов* проектируемого гидроузла назначают с учетом расположения створа в каскаде, аккумулирующей способности его водохранилища, условий эксплуатации существующих гидроузлов. Если класс водопропускных сооружений проектируемого гидроузла в каскаде ниже класса аналогичных сооружений вышерасположенного гидроузла, допускают увеличение пропускной способности проектируемых сооружений без повышения их класса.

Для *постоянных сооружений I...III классов* в период их временной эксплуатации в ходе строительства расчетные расходы принимают по классу

сооружений пускового комплекса (см. табл. 1.3). Для *временных сооружений* строительного периода максимальные расчетные расходы воды, как правило, принимают с расчетной ежегодной вероятностью превышения, равной 10%. Для временных сооружений, относимых к IV классу, расчетную вероятность превышения принимают 5%, к III классу — 3%, при наличии соответствующего обоснования — выше 10%.

Число водосбросных сооружений и размеры их поперечных сечений назначают исходя из требований пропуска расчетного расхода воды основного расчетного случая. Для поверочного расчетного случая пропуск расхода осуществляют в соответствии с указаниями, приведенными выше.

1.5. ОСНОВАНИЯ СООРУЖЕНИЙ

Основание — это часть грунтового массива, залегающая ниже подошвы сооружения (фундамента) и воспринимающая все его нагрузки. Основания должны обеспечивать нормальную эксплуатационную пригодность сооружений: они должны быть прочными, устойчивыми, деформироваться в допустимых пределах, а основания водоподпорных сооружений, кроме того, должны быть маловодопроницаемыми.

Основания подразделяют на естественные и искусственные. *Естественное* — основание, грунт которого в природном состоянии удовлетворяет указанным требованиям. *Искусственное* — основание, грунт которого улучшен в целях обеспечения этих требований.

Грунты (ГОСТ 25100—82) делят на два класса: с жесткими структурными связями — скальные и без жестких структурных связей — нескальные.

Грунты как основания гидротехнических сооружений характеризуются показателями их физических, физико-химических и физико-механических свойств.

1.5.1. ПОКАЗАТЕЛИ СВОЙСТВ ГРУНТОВ

Любой грунт представляет собой трехкомпонентную систему, состоящую из твердых частиц, воды и воздуха. Размер и форма частиц оказывают большое влияние на свойства только нескальных грунтов. Состав нескальных грунтов по крупности частиц называют *гранулометрическим*. Частицы различных размеров объединяют в группы, называемые *фракциями*. Количественное содержание каждой фракции выражают в процентах по отношению к общей массе сухого грунта. Фракции с частицами крупнее 0,1 мм выделяют, просеивая или промывая грунт через набор сит, а с более мелкими — отмучивая в воде — по скорости выпадения в осадок (ГОСТ 12536—79). Гранулометрический состав грунтов может быть *однородным* и *неоднородным*. Неоднородность его определяют по степени неоднородности C_U

$$C_U = d_{60}/d_{10}, \qquad (1.1)$$

где d_{60} и d_{10} — диаметры частиц, масса которых вместе с массой частиц меньшего диаметра составляет соответственно 60 и 10%.

При $C_U \geqslant 3$ грунты неоднородны.

Для лучшего понимания других показателей физических свойств грунт с некоторым объемом V (м³, см³) и массой m (кг, г, т) представлен на рисунке 1.2 в виде диаграммы, из которой следует, что

$$V = V_s + V_n = V_s + V_a + V_w, \quad \text{а} \quad m = m_s + m_w,$$

где V — объем грунта; m — масса грунта; V_s — объем твердых частиц; V_n — объем пор; V_a — объем воздуха (газа); V_w — объем воды; m_s — масса твердых частиц; m_w — масса воды.

Основные показатели физических свойств: плотность грунта $\rho = m/V$, плотность частиц $\rho_s = m_s/V_s$ и влажность $w = m_w/m_s$ определяют по резуль-

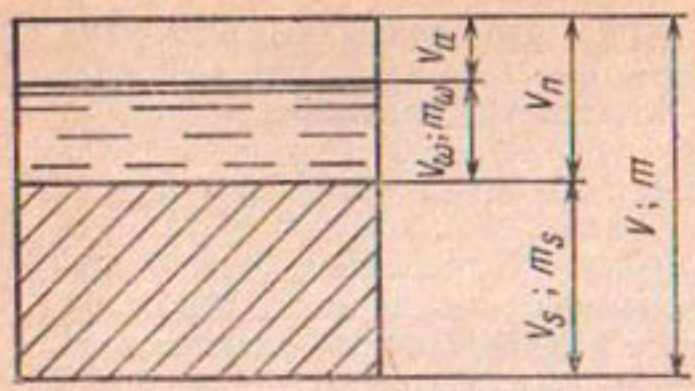


Рис. 1.2. Диаграмма состава грунта

татам исследования грунтов в полевых или лабораторных условиях. Все остальные показатели — производные от основных и определяют их по формулам (табл. 1.4).

Показатели физико-химических свойств грунтов определяют по результатам исследования грунтов в полевых или лабораторных условиях по формулам (табл. 1.5).

Показатели физико-механических свойств грунтов — угол внутреннего трения, удельное сцепление, предельное сопротивление грунта сдвигу определяют в лабораториях на сдвиговых (срезных) приборах (ГОСТ 12248—78) или в стабилометрах (приборах трехосного сжатия) на образцах нарушенной и ненарушенной структуры; модуль общей линейной деформации и коэффициент поперечного расширения (Пуассона) путем испытаний образцов в различного типа компрессионных приборах и стабилометрах. По результатам испытаний строят графики (рис. 1.3, 1.4) для определения показателей свойств грунта (табл. 1.6).

Скальные грунты. Гидротехническое строительство на скальных грунтах осложняется их трещиноватостью и выветрелостью. Многие скальные грунты имеют при лабораторных испытаниях в образцах пористость максимум 1...5%, а в массиве за счет трещин их пустотность достигает 10...20%. При оценке скальных грунтов как оснований крупных плотин или как среды гидротехнических туннелей необходимо учитывать возможность образования трещин разгрузки при устройстве котлованов и проходке туннелей.

Трещиноватость и выветрелость снижают прочность, увеличивают деформируемость и водопроницаемость оснований. В качестве естественного основания любых гидротехнических сооружений можно использовать невыветрелые, практически водонепроницаемые и нерастворимые скальные грунты. Сильновыветрелые для этой цели использовать нельзя, их необходимо удалить. Остальные скальные грунты используют как естественное основание после их улучшения.

Расчетные показатели прочности скальных грунтов $\operatorname{tg}\varphi_{I,II}$ и $c_{I,II}$ для сооружений I и II классов при простых инженерно-геологических условиях на предварительных стадиях проектирования следует принимать по таблице 1.7.

Нескальные грунты. В зависимости от состава, состояния и плотности сложения нескальные грунты для одних сооружений (легких) могут быть хорошим естественным основанием, для других — непригодны. Крупнообломочные грунты (масса частиц крупнее 2 мм составляет более 50%) по своей

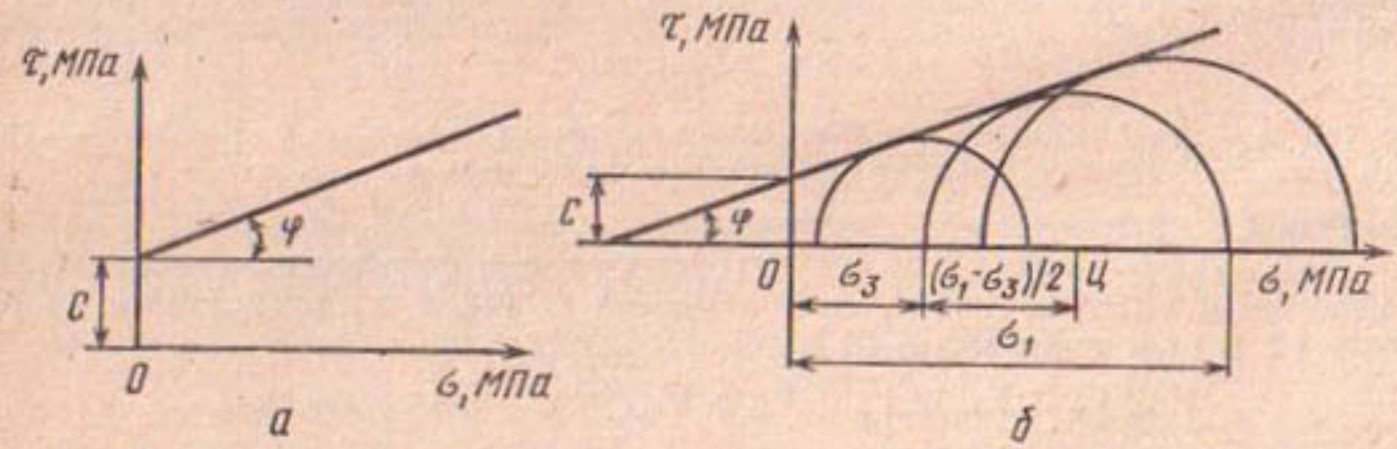


Рис. 1.3. Графики предельного сопротивления грунта сдвигу:

а — по результатам испытания образцов грунта в сдвиговом приборе; *б* — по результатам испытания образцов грунта в стабилометре; τ — предельное сопротивление грунта сдвигу; σ — нормальное (уплотняющее) напряжение; φ — угол внутреннего трения грунта; c — удельное сцепление грунта; σ_1 и σ_3 — соответственно максимальное и минимальное главные напряжения

1.4. Формулы для определения показателей физических свойств грунтов

Показатели и единицы измерения	Общая формула	Расчетные формулы
Плотность сухого грунта, кг/м³, г/см³, т/м³	$\rho_d = m_s/V$	$\rho_d = \rho/(1+w)$
Объем частиц в единице объема грунта	$n_s = V_s/V$	$n_s = \rho_d/\rho_s$ или $n_s = 1/(1+e)$
Пористость (объем пор в единице объема грунта)	$n = V_n/V$	$n = (1-n_s)$; $n = 1-(\rho_d/\rho_s)$ или $n = e/(1+e)$
Коэффициент пористости	$e = V_n/V_s$	$e = n_n/m_s = n_n/(1-n_n)$; $e = (\rho_s-\rho_d)/\rho_d$
Удельный вес грунта, Н/м³, кН/м³, МН/м³	$\gamma = mg/V$	$\gamma = \rho g$
Удельный вес сухого грунта, Н/м³, кН/м³, МН/м³	$\gamma_d = m_s g/V$	$\gamma_d = \rho_d g = \rho g/(1+w)$
Удельный вес взвешенного в воде грунта, Н/м³, кН/м³, МН/м³	$\gamma_{s,w} = (m_s g - F)/V$, где F — взвешивающая (выталкивающая) сила	$\gamma_{s,w} = \gamma_d - n_s\gamma_w$; $\gamma_{s,w} = (\gamma_s-\gamma_w)/(1+e)$, где γ_w — удельный вес воды
Степень влажности	$S_r = V_w/V_n$	$S_r = (\rho_s w)/(e\rho_w)$

Показатели	Расчетная формула	Принятые обозначения
Число пластичности глинистых грунтов	$I_p = (w_L - w_p)$	w_L — влажность на границе текучести, %; w_p — влажность на границе пластичности, %; w — природная влажность грунта, %
Показатель текучести глинистых грунтов	$I_L = (w - w_p)/(w_L - w_p)$	
Льдистость (отношение объема включений льда к общему объему грунта)	$i_i = \dfrac{\rho_s w_i}{\rho_i + \rho_s(w_{tot} - 0{,}1 w_w)}$	ρ_s — плотность частиц, г/см³; w_i — влажность мерзлого грунта за счет включений льда, г/г; ρ_i — плотность льда, $\rho_i = 0{,}9$ г/см³; w_{tot} — суммарная влажность мерзлого грунта, г/г; w_w — влажность мерзлого грунта за счет содержащейся незамерзшей воды, г/г
Относительное набухание	$\varepsilon_{sw} = (h_{sat} - h_p)/h_p$	h_g — высота образца природной влажности и плотности после обжатия без возможности бокового расширения давлением, равным вертикальному природному напряжению в рассматриваемой точке основания, см
Относительная просадка	$\varepsilon_{sl} = (h_p - h_{sat})/h_g$	h_p — высота того же образца после обжатия давлением, равным суммарному вертикальному напряжению в рассматриваемой точке основания, см h_{sat} — высота того же образца после замачивания до полного насыщения при давлении, равном суммарному вертикальному напряжению, см

1.6 Показатели физико-механических свойств грунтов

Показатели	Обозначения и расчетная формула	Примечания
Показатели прочности: угол внутреннего трения, град удельное сцепление, кПа, МПа	φ c	Определяют по графику предельного сопротивления грунта, построенному по результатам испытаний образцов грунта в сдвиговом приборе или в стабилометре
Предельное сопротивление грунтов сдвигу, кПа, МПа	$\tau=\sigma \operatorname{tg}\varphi+c$	σ — нормальное (уплотняющее) напряжение, МПа
Коэффициент бокового давления грунта	$\xi=\sigma_y/\sigma_z$	σ_z — вертикальное напряжение, МПа; σ_y — горизонтальное (боковое) напряжение при невозможности бокового расширения образца грунта, МПа
Коэффициент поперечного расширения (Пуассона)	$\nu=\xi/(1+\xi)=\sigma_y/(\sigma_y+\sigma_z)$	Определяют по результатам испытания грунтов без возможности расширения в стабилометре
Модуль общей линейной деформации при испытании грунтов: в стабилометре со свободным расширением образца	$E=(\sigma_{z2}-\sigma_{z1})/(\varepsilon_{z2}-\varepsilon_{z1})$	σ_{z2} — вертикальное (осевое) напряжение, равное (или меньшее) пределу пропорциональности на зависимости $\varepsilon=f(\sigma)$ при испытании грунтов в стабилометре, кПа, МПа; $\sigma_{z1}<\sigma_{z2}$ вертикальное напряжение, равное горизонтальному (боковому) напряжению
в стабилометре при невозможности бокового расширения	$E=(\sigma_z-2\nu\sigma_y)/\varepsilon_z$	
в компрессионном приборе	$E=\dfrac{(\sigma_{z2}-\sigma_{z1})(1+e_1)}{(e_1-e_2)}\left(1-\dfrac{2\nu^2}{1-\nu}\right)$	σ_y при испытании грунтов в стабилометре, кПа, МПа; ε_{z2}, ε_{z1}, ε_z — относительная, линейная, осевая деформации образца соответственно при σ_{z2}, σ_{z1}, σ_z; e_1 и e_2 — коэффициенты пористости грунта при осевом (вертикальном) напряжении σ_{z1} и σ_{z2} соответственно

1.7. Расчетные показатели прочности $\operatorname{tg}\varphi_{I,II}$ и $c_{I,II}$ (МПа) скальных грунтов

Грунты оснований	При расчетах местной прочности оснований для поверхностей сдвига, не совпадающих с трещинами и с контактом бетон — скала		При расчетах устойчивости и местной прочности для поверхностей и площадок сдвига по контакту бетон — скала; устойчивости для поверхностей сдвига в массиве частично по трещинам и монолиту		При расчетах устойчивости и местной прочности для поверхностей и площадок сдвига в массиве по трещинам, заполненным песчаным и глинистым грунтом, шириной раскрытия, мм					
					<2 (в том числе сомкнутые)		2 ... 20		>20	
	$\operatorname{tg}\varphi_{II}$	c_{II}	$\frac{\operatorname{tg}\varphi_I}{\operatorname{tg}\varphi_{II}}$	$\frac{c_I}{c_{II}}$	$\frac{\operatorname{tg}\varphi_I}{\operatorname{tg}\varphi_{II}}$	$\frac{c_I}{c_{II}}$	$\frac{\operatorname{tg}\varphi_I}{\operatorname{tg}\varphi_{II}}$	$\frac{c_I}{c_{II}}$	$\frac{\operatorname{tg}\varphi_I}{\operatorname{tg}\varphi_{II}}$	$\frac{c_I}{c_{II}}$
Скальные с временным сопротивлением одноосному сжатию $R>50$ МПа массивные, крупноблочные, блочные, слоистые, плитчатые: слаботрещиноватые невыветрелые	3	4	$\frac{0,95}{1,1}$	$\frac{0,4}{0,72}$	$\frac{0,8}{0,92}$	$\frac{0,15}{0,27}$	$\frac{0,7}{0,80}$	$\frac{0,10}{0,18}$	$\frac{0,55}{0,63}$	$\frac{0,05}{0,09}$
среднетрещиноватые слабовыветрелые	2,4	2,5	$\frac{0,85}{0,98}$	$\frac{0,3}{0,54}$	$\frac{0,8}{0,92}$	$\frac{0,15}{0,27}$	$\frac{0,7}{0,80}$	$\frac{0,10}{0,18}$	$\frac{0,55}{0,63}$	$\frac{0,05}{0,09}$
Скальные с $R=15...50$ МПа массивные, крупноблочные, блочные, слоистые, плитчатые сильнотрещиноватые; скальные с $R=5...15$ МПа слабовыветрелые, но малопрочные, слаботрещиноватые	2	1,5	$\frac{0,75}{0,86}$	$\frac{0,2}{0,36}$	$\frac{0,7}{0,80}$	$\frac{0,1}{0,18}$	$\frac{0,65}{0,75}$	$\frac{0,05}{0,09}$	$\frac{0,45}{0,52}$	$\frac{0,02}{0,04}$
Полускальные с $R<5$ МПа плитчатые, тонкоплитчатые средне- и сильнотрещиноватые	1,5	0,3	$\frac{0,7}{0,80}$	$\frac{0,10}{0,18}$	$\frac{0,65}{0,75}$	$\frac{0,05}{0,09}$	$\frac{0,5}{0,57}$	$\frac{0,03}{0,05}$	$\frac{0,45}{0,52}$	$\frac{0,02}{0,04}$

Примечание. В числителе — расчетные значения для первой группы предельных состояний $\operatorname{tg}\varphi_I$ и c_I; в знаменателе — для второй $\operatorname{tg}\varphi_{II}$ и c_{II}.

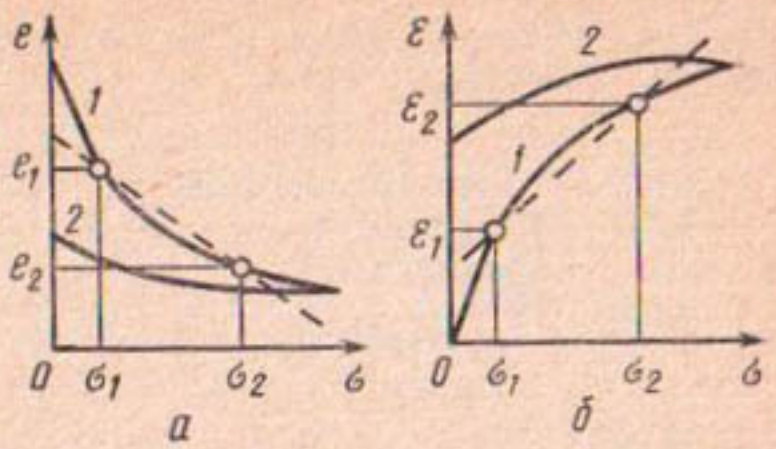


Рис. 1.4. Компрессионная кривая (*а*) и зависимость относительной деформации от нагрузки (*б*):

1 — ветвь загрузки; *2* — ветвь разгрузки; *e* — коэффициент пористости; *ε* — относительная деформация образца; *σ* — нагрузка

прочности, как правило, являются надежным основанием для большинства сооружений. Для плотин (особенно высоконапорных) и других подпорных сооружений в качестве естественного основания они непригодны из-за большой фильтрационной способности.

Ориентировочные коэффициенты фильтрации грунтов k, м/сут, приведены ниже.

Глина	$5 \cdot 10^{-5}$
Суглинок	$5 \cdot 10^{-5} \ldots 5 \cdot 10^{-3}$
Супесь	$5 \cdot 10^{-3} \ldots 5 \cdot 10^{-1}$
Песок пылеватый	$5 \cdot 10^{-1} \ldots 1$
Песок мелкий	1...5
Песок средней крупности	5...10
Песок крупный	10...100
Песок гравелистый	100...500
Крупнообломочный	>500

Пригодность остальных нескальных грунтов в качестве естественного основания приведена ниже.

Песчаные грунты:	
плотного сложения	Для любых сооружений
средней плотности	Для легких сооружений, непригодны для тяжелых (обосновывают расчетом)
рыхлого сложения	Непригодны во всех случаях
гравелистые и крупные пески любой плотности	Непригодны для плотин и других подпорных сооружений из-за большой фильтрационной способности
Глинистые грунты:	
твердые (ненабухающие и непросадочные)	Для любых сооружений
текучие	Непригодны во всех случаях
Лессовые грунты	Непригодны во всех случаях из-за большой деформируемости при увлажнении
Биогенные (торфы, сапропели)	Пригодны в отдельных случаях при специальном обосновании

Прочность нескальных грунтов оценивают их предельным сопротивлением сдвигу, а *деформируемость* — модулем общей линейной деформации и коэффициентом Пуассона, определяемыми по результатам лабораторных и полевых исследований грунтов. Деформируемость глинистых набухающих и просадочных грунтов, кроме того, оценивают относительным набуханием и относительной просадкой, соответственно определяемыми по результатам лабораторных испытаний.

Для предварительных расчетов коэффициент Пуассона принимают по данным, приведенным ниже.

Грунт	ν
Крупнообломочные	0,27
Пески и супеси	0,30
Суглинки	0,33...0,37
Глины:	
пластичные	0,38...0,45
твердые	0,20...0,30

Показатели физико-механических свойств песчаных и глинистых грунтов — по таблицам 1.8....1.10.

1.8. Нормативные значения удельного сцепления c_n (кПа), угла внутреннего трения φ_n (град) и модуля деформации E (МПа) песчаных грунтов четвертичных отложений

Песчаный грунт	Коэффициент пористости e			
	0,45	0,55	0,65	0,75
Гравелистый и крупный	2; 43; 50	1; 40; 40	—; 38; 30	—
Средней крупности	3; 40; 50	2; 38; 40	1; 35; 30	—
Мелкий	6; 38; 48	4; 36; 38	2; 32; 28	—; 28; 18
Пылеватый	8; 36; 39	6; 34; 28	4; 30; 18	2; 26; 11

1.9. Нормативные значения удельного сцепления c_n (кПа) и угла внутреннего трения φ_n (град) пылевато-глинистых нелессовых грунтов четвертичных отложений

Грунты	Показатель текучести	Коэффициент пористости e						
		0,45	0,55	0,65	0,75	0,85	0,95	1,05
Супеси	$0 \leqslant I_L \leqslant 0{,}25$	21; 30	17; 29	15; 27	13; 24	—	—	—
	$0{,}25 < I_L \leqslant 0{,}75$	19; 28	15; 26	13; 24	11; 21	9; 18	—	—
Суглинки	$0 \leqslant I_L \leqslant 0{,}25$	47; 26	37; 25	31; 24	25; 23	22; 22	19; 20	—
	$0{,}25 < I_L \leqslant 0{,}5$	39; 24	34; 23	28; 22	23; 21	18; 19	15; 17	—
	$0{,}5 < I_L \leqslant 0{,}75$	—	—	25; 19	20; 18	16; 16	14; 14	12; 12
Глины	$0 \leqslant I_L \leqslant 0{,}25$	—	81; 21	68; 20	54; 19	47; 18	41; 16	36; 14
	$0{,}25 < I_L \leqslant 0{,}5$	—	—	57; 18	50; 17	43; 16	37; 14	32; 11
	$0{,}5 < I_L \leqslant 0{,}75$	—	—	45; 15	41; 14	36; 12	33; 10	29; 7

1.5.2. МЕТОДЫ УЛУЧШЕНИЯ ГРУНТОВ ОСНОВАНИЙ

Способы устройства искусственных оснований делят на две группы: замена слабого грунта на более прочный, именуемая устройством грунтовых подушек, и улучшение физико-механических свойств грунтов естественного сложения. Методы улучшения физико-механических свойств грунтов, в свою очередь, делят также на две группы: физико-механические и физико-химические.

Выбор способа устройства искусственного основания или метода улучшения грунтов определяется целью мероприятия (придание грунту прочности, уменьшение деформируемости или водопроницаемости), видом, составом и состоянием грунта, а также размерами основания, из которых определяющим является мощность грунтов, подлежащих улучшению.

1.10. Нормативные значения модуля деформации E (МПа) пылевато-глинистых нелессовых грунтов

Происхождение и возраст грунтов	Грунт	Показатель текучести	Коэффициент пористости e										
			0,35	0,45	0,55	0,65	0,75	0,85	0,95	1,05	1,2	1,4	1,6
Четвертичные отложения:													
аллювиальные	Супеси	$0 \leqslant I_L \leqslant 0{,}75$	—	32	24	16	10	7	—	—	—	—	—
делювиальные		$0 \leqslant I_L \leqslant 0{,}25$	—	34	27	22	17	14	11	—	—	—	—
озерные	Суглинки	$0{,}25 < I_L \leqslant 0{,}5$	—	32	25	19	14	11	8	—	—	—	—
озерно-аллювиальные		$0{,}50 < I_L \leqslant 0{,}75$	—	—	—	17	12	8	6	5	—	—	—
	Глины	$0 \leqslant I_L \leqslant 0{,}25$	—	—	28	24	21	18	15	12	—	—	—
		$0{,}25 < I_L \leqslant 0{,}5$	—	—	—	21	18	15	12	9	—	—	—
		$0{,}5 < I_L \leqslant 0{,}75$	—	—	—	—	15	12	9	7	—	—	—
флювиогляциальные	Супеси	$0 \leqslant I_L \leqslant 0{,}75$	—	33	24	17	11	7	—	—	—	—	—
	Суглинки	$0 \leqslant I_L \leqslant 0{,}25$	—	40	33	27	21	—	—	—	—	—	—
		$0{,}25 < I_L \leqslant 0{,}5$	—	35	28	22	17	14	—	—	—	—	—
		$0{,}5 < I_L \leqslant 0{,}75$	—	—	—	17	13	10	7	—	—	—	—
моренные	Супеси; суглинки	$I_L \leqslant 0{,}5$	75	55	45	—	—	—	—	—	—	—	—
Юрские отложения оксфордского яруса	Глины	$-0{,}25 \leqslant I_L \leqslant 0$	—	—	—	—	—	—	27	25	22	—	—
		$0 \leqslant I_L \leqslant 0{,}25$	—	—	—	—	—	—	24	22	19	15	—
		$0{,}25 < I_L \leqslant 0{,}5$	—	—	—	—	—	—	—	—	16	12	10

Физико-механические способы улучшения грунтов: поверхностное уплотнение тяжелыми трамбовками, глубинное уплотнение грунтовыми сваями и т. п.

Уплотнение тяжелыми трамбовками (массой 2...7 т, сбрасываемых с высоты 4...8 м) применяют при улучшении грунтов на глубину 1,5...3,5 м. Статическое контактное напряжение по подошве трамбовки для уплотнения песчаных грунтов должно быть не менее 0,015 МПа, глинистых — не менее 0,02 МПа. *Глубинное уплотнение грунтовыми сваями* используют при уплотнении грунтов до глубины 20 м. Сваи (в водонасыщенных грунтах обычно песчаные) в плане располагают в шахматном порядке равномерно по всей площади уплотняемого грунтового массива с расстоянием (м) между ними

$$a = 0{,}952d\sqrt{\rho_{d_2}/(\rho_{d_2} - \rho_{d_1})}, \qquad (1.2)$$

где d — диаметр инвентарной металлической сваи, используемой для устройства грунтовой сваи, м; ρ_{d2} — расчетная (проектная) плотность сухого грунта после уплотнения, т/м³; ρ_{d1} — плотность сухого грунта естественного (природного) сложения, т/м³.

Физико-химические способы улучшения грунтов: цементация, битумизация, силикатизация, термическая обработка грунтов и т. п.

Цементацией улучшают грунты, имеющие коэффициент фильтрации не менее 80 м/сут при скорости движения воды не более 100 м/сут. Такой коэффициент фильтрации обычно имеют трещиноватые скальные и крупнообломочные грунты, гравелистые и крупные пески. Цементацию производят нагнетанием в грунт через инъекторы водоцементного раствора, имеющего водоцементное отношение 0,4...10 в зависимости от водопроницаемости, оцениваемой водопоглощением при нагнетании воды в скважину. Диаметр скважин-инъекторов зависит от мощности улучшаемого грунта и изменяется от 30 до 200 мм.

Битумизацию — нагнетание в грунт через скважины битума, разогретого до температуры 200 °С, — используют при скорости движения воды в грунтах более 100 м/сут и агрессивности грунтовых вод к цементу.

Силикатизацией улучшают песчаные и макропористые (лессовые просадочные) грунты. В песчаных грунтах с коэффициентом фильтрации 2... 80 м/сут применяют двухрастворный способ силикатизации: последовательное нагнетание в грунт через инъекторы (трубы с внутренним диаметром 19...38 мм и перфорированным нижним концом) растворов жидкого стекла (силиката натрия) $Na_2O \cdot nSiO_2$ и хлористого кальция $CaCl_2$ в соотношении 1 : 1. В результате химической реакции образуется нерастворимый в воде гель кремниевой кислоты $nSiO_2mH_2O$, создающий прочные структурные связи.

Для улучшения песчаных грунтов, имеющих коэффициент фильтрации 0,5...5 м/сут, применяют однорастворный способ силикатизации, заключающийся в нагнетании смеси одной части жидкого стекла и трех-четырех частей фосфорной кислоты (H_3PO_4). В результате химической реакции между ними в грунте также образуется гель кремниевой кислоты.

Для улучшения лессовых грунтов в грунт нагнетают только раствор жидкого стекла, так как они в своем составе имеют сернокислый кальций, достаточный для химической реакции с образованием геля кремниевой кислоты.

Силикатизация неэффективна в грунтах, пропитанных нефтяными продуктами, а также при водородном показателе pH водной вытяжки более 9 при двухрастворном и более 7,2 при однорастворном способе.

Термической обработкой улучшают маловлажные макропористые лессовые грунты, для чего в скважины нагнетают горячий воздух с температурой 600...800 °С или сжигают в скважинах жидкое топливо, подаваемое через форсунки, с одновременным нагнетанием холодного воздуха. Термическая обработка практически полностью ликвидирует просадочность грунтов, но увеличивает их водопроницаемость. Поэтому для улучшения грунтов оснований водоподпорных сооружений ее не применяют.

Предварительное замачивание на современном этапе — наиболее распространенный способ ликвидации просадочности лессовых грунтов.

1.6. ТИПИЗАЦИЯ СООРУЖЕНИЙ МЕЛИОРАТИВНОГО НАЗНАЧЕНИЯ

Отличительная особенность мелиоративных гидротехнических сооружений — их массовость при относительно небольших размерах.

Массовость однотипных сооружений позволяет осуществить их типизацию и широко использовать стандартные оборудование, типовые конструкции из сборных элементов, инвентарную оснастку, специальные машины и механизмы. Это обеспечивает индустриализацию строительства сооружений, сокращает сроки проектирования и строительства, повышает их эксплуатационные качества, облегчает автоматизацию процессов работы.

Сетку типоразмеров типовых сооружений обосновывают оптимизационным расчетом, исходя из достижения суммарной минимальной стоимости всей системы сооружений с учетом их повторяемости.

Основным материалом при строительстве сооружений (кроме грунтовых) служит монолитный или сборный бетон и железобетон. Несмотря на различия, оба материала близки по конструктивным особенностям и технологии изготовления. Монолитный бетон и железобетон во многих случаях позволяют получить более экономичную конструкцию сооружения. Вместе с тем применение сборного железобетона позволяет организовать строительство в зимний период, вести работы с произвольными паузами и концентрацией во времени в отличие от монолитного бетона и железобетона, требующих более жестко организованного технологического процесса. При использовании передовой индустриальной технологии укладки монолитного бетона с применением высокопроизводительных машин, эффективных механизмов и приспособлений снижается построечная трудоемкость возведения сооружений, не уступающая соответствующим показателям сборных конструкций, а иногда и превосходящая их.

Дополнительные условия назначения классов сооружений

Согласно СНиП 2.06.01—86 введены дополнительные условия, которые необходимо учитывать при назначении классов гидротехнических сооружений. Так, класс водоподпорных сооружений водохранилищных гидроузлов зависит и от объема водохранилища:

Объем водохранилища, млн. м³	50 и менее	Свыше 50 До 200	Свыше 200 До 1000	Свыше 1000
Класс водоподпорного сооружения	IV	III	II	I

При определении класса мелиоративного канала следует учитывать стоимость валовой продукции, полученной водопотребителем, согласно приведенному ниже соотношению:

Суммарная годовая стоимость валовой продукции, млн. р.	Менее 100	100...500	500...1000	Свыше 1000
Класс мелиоративного канала и сооружений на нем	IV	III	II	I

Глава 2

НАГРУЗКИ И ВОЗДЕЙСТВИЯ НА СООРУЖЕНИЯ. ОСОБЕННОСТИ РАСЧЕТОВ ПО ПРЕДЕЛЬНЫМ СОСТОЯНИЯМ

2.1. НАГРУЗКИ И ВОЗДЕЙСТВИЯ

Расчеты прочности и устойчивости сооружений при эксплуатации, строительстве и ремонте выполняют для двух сочетаний нагрузок и воздействий: основного и особого. *Основное сочетание* включает постоянные, временные длительные и кратковременные нагрузки (рис. 2.1), а *особое* — постоянные, временные длительные, отдельные кратковременные и одну из особых нагрузок (рис. 2.1).

2.1. Остаточное фильтрационное давление противофильтрационных устройств и дренажей

Вид плотин	При нормальной работе			При нарушении работы		
	с цементационной завесой		без цементационной завесы	с цементационной завесой		без цементационной завесы
	H_{as}/H_d	H_{dr}/H_d	H_{dr}/H_d	H_{as}/H_d	H_{dr}/H_d	H_{dr}/H_d
Гравитационные без полостей у основания (см. рис. 2.3, *а* и *б*):						
I класса	0,4	0,2	0,2	0,5	0,3	0,4
II класса	0,4	0,15	0,15	0,5	0,2	0,3
III, IV классов	0,3	0,05	0,05	0,35	0,1	0,1
Гравитационные с продольной полостью (см. рис. 2.3, *в*) I...IV классов	0,3	0,1	0,1	0,35	0,15	0,2
Гравитационные с расширенными швами, контрфорсные (см. рис. 2.3, *г*) I...IV классов	0,2	0,05	0,05	0,25	0,1	0,1
Арочные (см. рис. 2.3, *е*) I...IV классов	0,4	0,2	0,2	0,6	0,35	0,4

Примечание. Для контрфорсных плотин с плоскими перекрытиями и многоарочных эпюру фильтрационного давления принимают по треугольнику с ординатой, равной 0 на низовой грани напорного перекрытия.

В период эксплуатации и строительства нагрузки принимают в наиболее неблагоприятных возможных сочетаниях с учетом последовательности возведения и загрузки сооружения.

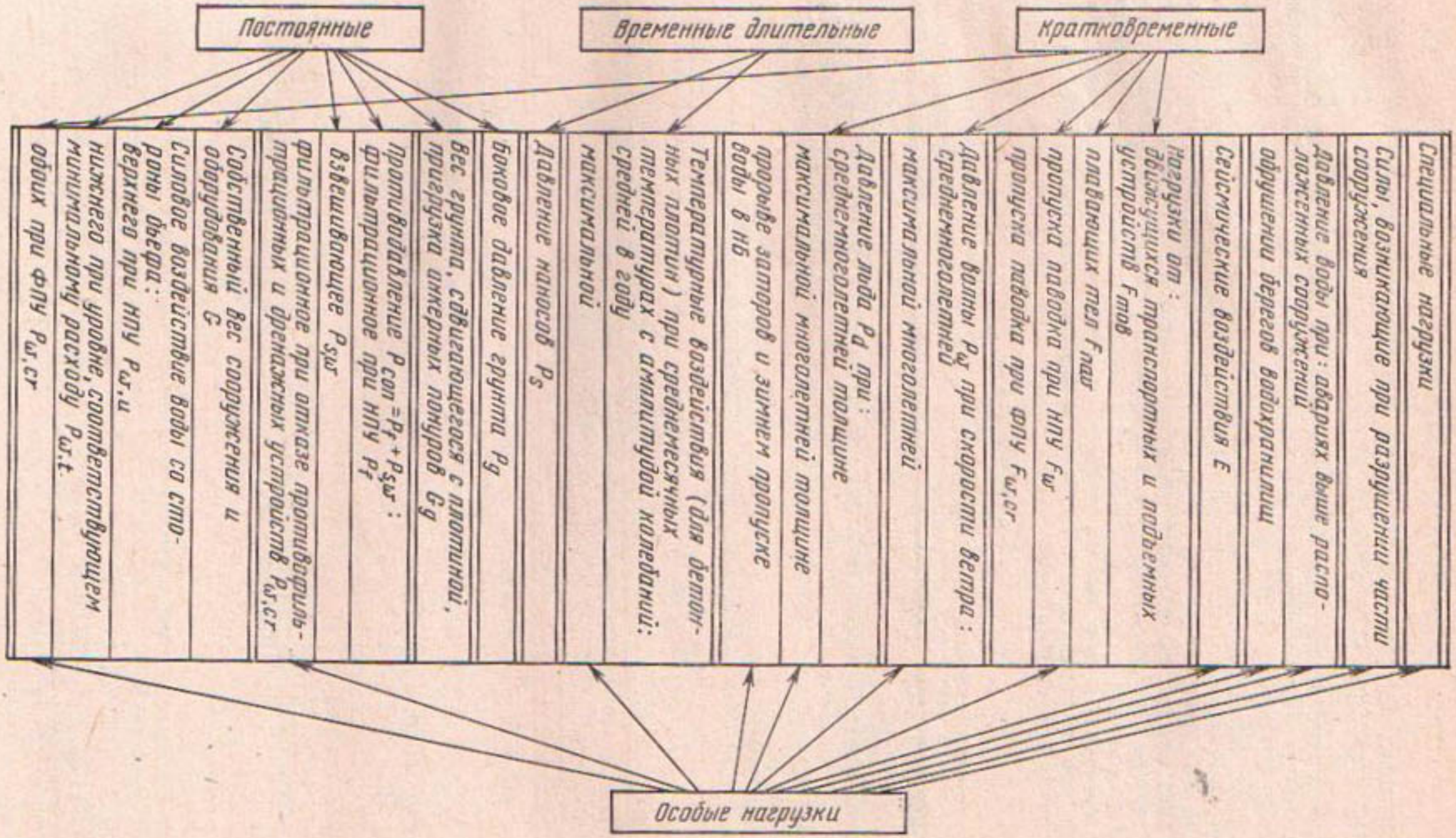


Рис. 2.1. Схема нагрузок и воздействий на гидротехнические сооружения (более подробно см. СНиП 2.06.01—86).

2.2. ОПРЕДЕЛЕНИЕ НАГРУЗОК И ВОЗДЕЙСТВИЙ

Постоянные нагрузки. По чертежам определяют *вес сооружения и оборудования G*, грунта, сдвигающегося с плотиной, пригрузку анкерных понуров G_g.

Силовое воздействие воды на грани плотины P_w со стороны ВБ и НБ определяют как гидростатическое при ее плотности $\rho_w = 1$ т/м³; при наличии взвешенных наносов $\rho_s = 1...1{,}1$ т/м³.

Силовое воздействие фильтрующейся воды учитывают в виде противодавления, действующего на горизонтальные участки подземного контура сооружения, при расчетах плотин III и IV классов на нескальных основаниях, плотин всех классов на скальных основаниях высотой до 60 м, а также при предварительных расчетах плотин I и II классов на нескальном (любой высоты) и скальном (высотой более 60 м) основаниях. При окончательном расчете последних типов плотин силовое воздействие фильтрующейся воды включает противодавление и объемные фильтрационные силы в основании.

Противодавление P_{con} равно

$$P_{con} = P_{s,w} + P_f, \qquad (2.1)$$

где $P_{s,w}$ — взвешивающее противодавление на флютбет, погруженный под уровень воды в НБ, по закону Архимеда; P_f — вертикальная составляющая фильтрационной силы, возникающая при движении фильтрационного потока под сооружением.

Эпюры силового воздействия воды на подземный контур водоподпорных сооружений показаны на рисунке 2.2. Ординаты эпюр определяют расчетом; силы — произведением площади эпюры рассматриваемого участка на плотность воды.

Для бетонных плотин на скальных основаниях высотой менее 60 м при наличии противофильтрационных завес и дренажных устройств противодав-

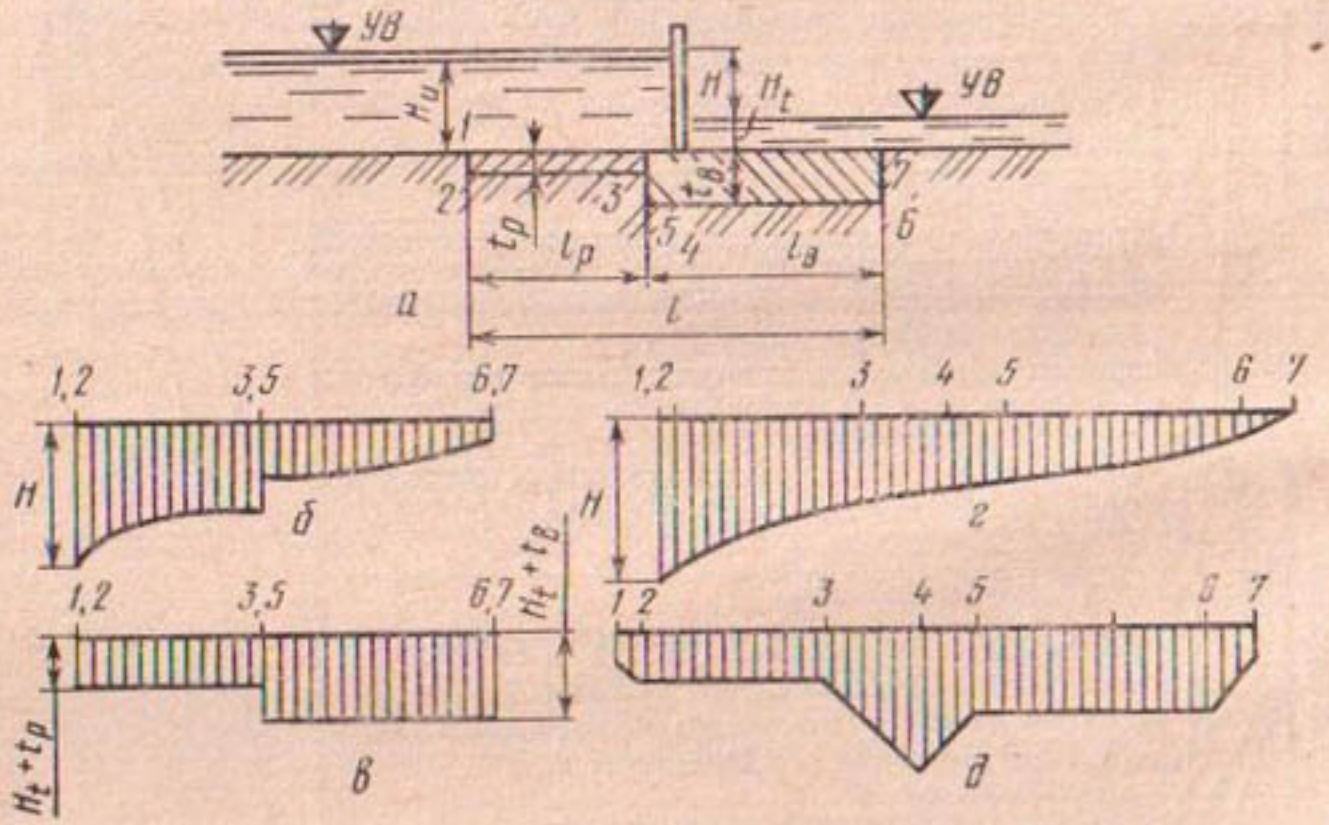


Рис. 2.2. Эпюры силового воздействия воды на подземный контур водоподпорных сооружений:

а — разрез по сооружению; *б* — эпюра фильтрационного противодавления на горизонтальную проекцию контура; *в* — эпюра взвешивающего противодавления на ту же проекцию; *г* — эпюра фильтрационного давления по развернутому контуру; *д* — заглубление точек подземного контура под уровень воды НБ по развернутому контуру; *1...7* — узловые точки подземного контура; H_u, H_t — напор в ВБ и НБ; H — разность уровней в ВБ и НБ; t_p, t_b — толщина понура и водобоя; l_p, l_b, l — длина понура, водобоя и общая подземного контура

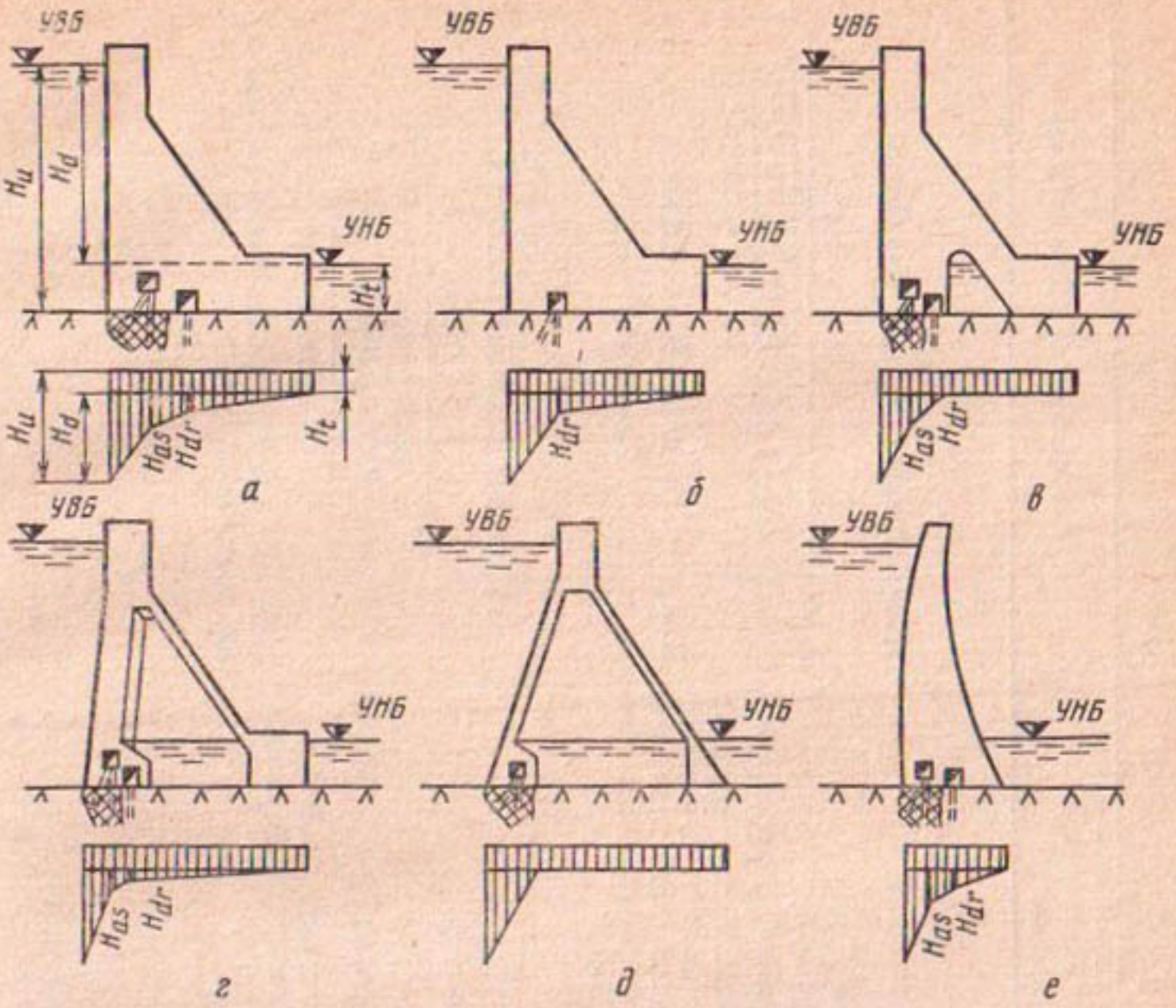


Рис. 2.3. Эпюры пьезометрического напора по подошве плотины:

а, б, в — гравитационная плотина соответственно с цементационной завесой и в основании без цементационной завесы, с продольной полостью у основания; *г* — массивно-контрфорсная плотина и гравитационная с расширенными швами; *д* — контрфорсная плотина с плоским перекрытием; *е* — арочная плотина; H_d — напор на плотину

ление определяют с учетом остаточных фильтрационных напоров: на оси завесы — H_{as}, по оси дренажа — H_{dr}. Эпюры противодавлений по контакту плотины со скальным основанием приведены на рисунке 2.3, значения остаточных фильтрационных напоров — в таблице 2.1.

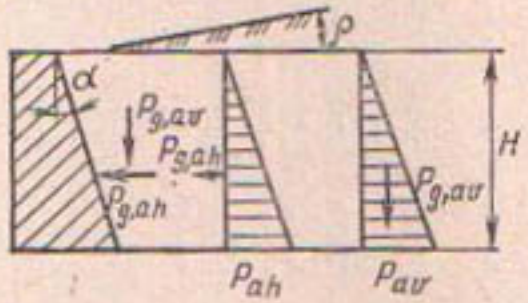
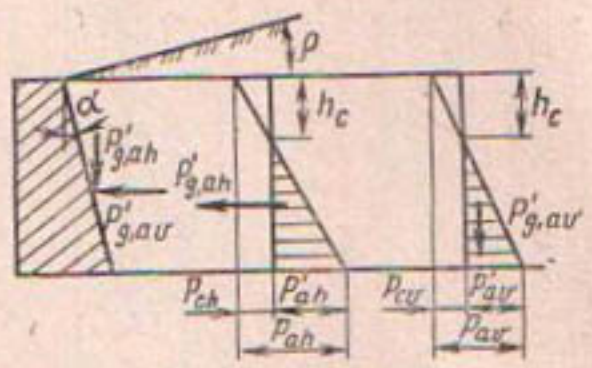
В остальных случаях для плотин I...III классов воздействие фильтрующейся воды определяют методами гидромеханики или ЭГДА; для плотин IV класса и на предварительных стадиях проектирования всех плотин допускается использование методов коэффициентов сопротивления, фрагментов и др.

Давление грунта на сооружение, заложенное в грунт, обычно это трубчатое сооружение, можно определить по таблице 6.40.

Боковое давление грунта на сооружение определяется равнодействующей P_g сил, приложенных к тыловой грани, и зависит от наклона стенок. Различают стенки крутые ($\alpha \leqslant \alpha_n$) и пологие ($\alpha > \alpha_n$), где α — угол между вертикалью и тыловой гранью положителен при наклоне к стенке; α_n — критерий пологости, значения которого в зависимости от угла внутреннего трения φ грунта приведены ниже:

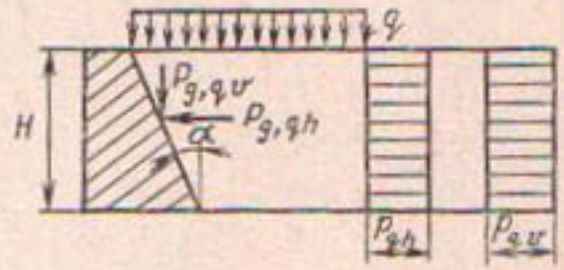
φ, град	15	20	25	30	35	40
α_n, град	71	69,8	68,3	67	65,3	64

При $\alpha_n > 65°$ стенку считают пологой.

Расчетное давление и схема	Расчетные формулы для горизонтальных p_h и вертикальных p_v составляющих бокового давления	Коэффициент бокового давления
Активное давление при свободной p_a от нагрузки поверхности грунта (смещение стенки от грунта)	При несвязном грунте засыпки	Коэффициент активного давления
	$p_{ah}=\gamma y\lambda_a;$ $p_{av}=p_{ah}\operatorname{tg}(\alpha+\delta),$ где δ — угол трения грунта на контакте со стенкой, при шероховатости стен равен φ, для мелкозернистых водонасыщенных песков и при вибрационных нагрузках, при битумных обмазках — 0, в остальных случаях приближенно —0,5 φ	$\lambda_a=\left[\frac{\cos(\varphi-\alpha)}{\cos\alpha\left(1+\sqrt{\frac{\sin(\varphi+\delta)\sin(\varphi-\rho)}{\cos(\alpha+\delta)\cos(\alpha-\rho)}}\right)}\right]^2.$ При $\rho=0$ и гладкой поверхности стенки $\lambda_a=\operatorname{tg}^2(45°-\varphi/2)$
	При связном грунте засыпки $p'_{ah}=p_{ah}-p_{c,h};$ $p'_{av}=p'_{ah}\operatorname{tg}(\alpha+\delta),$ где p_{ch} — давление связности, $p_{ch}=k_c c$ При $\rho=0$ и $\alpha=0$ (горизонтальная поверхность и вертикальная стена) $p'_{ah}=\gamma y\lambda_a+c(\lambda_a-1)/\operatorname{tg}\varphi$	Коэффициент давления связности $k_c=\frac{1}{\operatorname{tg}\varphi}\left[\frac{\cos(\alpha+\delta)}{\cos\alpha\cos\delta}-\right.$ $\left.-\lambda_a\frac{\cos\alpha\cos\rho}{\cos(\alpha-\rho)}\right].$ Если при расчете правая часть меньше нуля, принимают $k_c=0$

ρ — угол наклона поверхности грунта к горизонту, положителен при отклонении вверх, $|\rho|\leqslant\varphi$; α — угол наклона тыловой грани от вертикали, положителен при отклонении в сторону стенки

Дополнительное давление от поверхностной нагрузки p_q



От сплошной* равномерно распределенной в пределах призмы обрушения нагрузки

$$p_{qh}=q\lambda_a;$$

$$p_{qv}=p_{qh}\operatorname{tg}(\alpha+\delta)$$

Пассивное давление p_p (смещение стенки на грунт)

При однородной засыпке с горизонтальной поверхностью

$$p_{ph}=(q+\gamma y)\lambda_{p,h}+$$

$$+\frac{c}{\operatorname{tg}\varphi}\left[\lambda_{p,h}-\frac{\cos(\alpha+\delta)}{\cos\alpha\cos\delta}\right];$$

$$p_{pv}=p_{ph}\operatorname{tg}(\alpha+\delta)$$

Коэффициент пассивного давления

$$\lambda_{p,h}=\left[\frac{\cos(\varphi-\alpha)}{\cos\alpha\left(1-\sqrt{\frac{\sin(\varphi+\delta)\sin\varphi}{\cos(\alpha+\delta)\cos\alpha}}\right)}\right]^2.$$

В частном случае при

$$\alpha=\delta=0$$

$$\lambda_{\varphi,h}=\operatorname{tg}^2(45°+\varphi/2)$$

Давление покоя p_0 (перемещение стенки отсутствует)

При однородной засыпке с горизонтальной поверхностью

$$p_{o,h}=(\gamma y+q)\lambda_{o,h};$$

при слоистой засыпке

$$p_{o,h}=\left(\sum_{i=1}^{n}\gamma_i\Delta h_i+q\right)\lambda_{o,h},$$

где Δh_i — высота i-го слоя; n — число слоев

Коэффициент давления покоя

$$\lambda_{o,h}=\nu(1+\nu)$$

---

* При равномерно распределенной нагрузке, приложенной на расстоянии a от стенки, составляющие p_{qh} и p_{qv} ниже отметки $y=a/(\operatorname{tg}\alpha+\operatorname{tg}\theta)$ определяют по тем же формулам, выше — равны 0; при полосовой нагрузке шириной b, приложенной на расстоянии a от стенки, p_{qh} и p_{qv} имеют те же значения в полосе $a/(\operatorname{tg}\alpha+\operatorname{tg}\theta)<y<(a+b)/(\operatorname{tg}\alpha+\operatorname{tg}\theta)$, выше и ниже они равны 0; угол $\theta=45°-\varphi/2$.

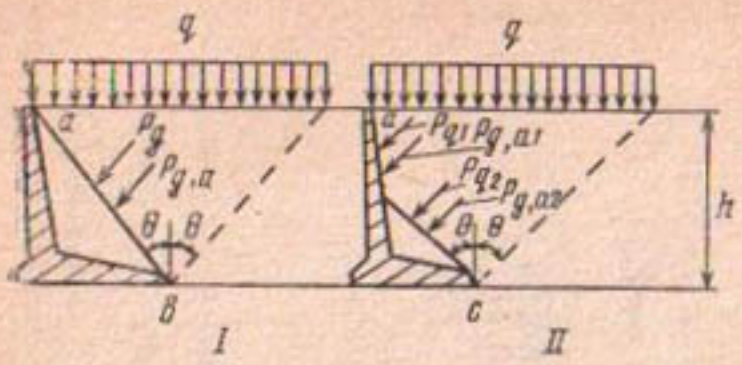


Рис. 2.4. Боковое давление грунта на уголковую подпорную стенку:
I — при длинной опорной плите и симметричной призме обрушения (*ab* — условная поверхность); *II* — при короткой опорной плите и несимметричной призме обрушения (*abc* — условная поверхность); P_q, P_{q1}, P_{q2} — боковое давление от сплошной равномерно распределенной нагрузки q; P_a, P_{a1}, P_{a2} — активное давление грунта; θ — отклонение условной поверхности от вертикали; h — высота стенки

Различают активное давление грунта $P_{g.a}$ — при смещении грани сооружения от грунта, пассивное давление $P_{g.p}$ — при смещении стены на грунт и давление покоя $P_{g.o}$ — при практическом отсутствии перемещения стенки Δ ($\Delta < 0{,}0005\,h$ стенки). Основные расчетные случаи бокового давления даны в таблице 2.3.

Равнодействующие $P_{g.a}$, $P_{g.p}$, $P_{g.o}$ определяются площадью эпюр бокового давления. Так, для расчетных случаев (табл. 2.3) при несвязном грунте

$$P_{g,ah} = p_{a,h}H/2; \qquad P_{g,av} = p_{a,v}H/2; \tag{2.2}$$

при связном грунте

$$P'_{g,ah} = p_{a,h}\,(H - h_c)/2; \qquad P'_{g,av} = p'_{a,v}\,(H - h_c)/2, \tag{2.3}$$

где h_c — высота грунта, соответствующая его связности, $h_c = p_{c,h}H/p_{a,h}$.

Для уголковых стен боковое давление определяют по соответствующим формулам таблицы 2.2 для условной поверхности двух возможных случаев, представленных на рисунке 2.4. При этом $\alpha = \theta = 45° - \varphi/2$, $\delta = \varphi$. Вес грунта между условной поверхностью и тыловой гранью стены добавляют к весу стены.

Временные длительные нагрузки. Временные нагрузки включают обычно давление наносов и температурные воздействия. *Давление наносов* P_s со стороны ВБ на 1 м длины сооружения можно вычислить по формуле

$$P_s = 0{,}5g\rho_s h_s^2 \operatorname{tg}(45° - \varphi_s/2), \tag{2.4}$$

где ρ_s — плотность наносов во взвешенном состоянии, $\rho_s = \rho_d - \rho_w\,(1-n)$ [ρ_d — плотность сухих наносов (табл. 2.3); n — пористость слоя наносов]; h_s — высота слоя наносов; φ_s — угол внутреннего трения грунта наносов. У плотин небольшой высоты на реках обычно откладываются песчано-гравелистые, песчаные и другие крупнозернистые наносы; у высоких водохранилищных плотин — частицы ила, глины, коллоидные частицы.

Температурные воздействия (для бетонных и железобетонных сооружений) включают экзотермический разогрев бетона при гидратации цемента, климатические изменения температуры наружного воздуха и воды, разогрев от солнечной инсоляции. Подъем температуры блока при *экзотермическом разогреве* t_{ext} может достигнуть 25...50 °С. Тепловыделение особенно интенсивно в первые 5...10 сут, при остывании возможна неравномерность распределения температуры в блоке. Приближенно

$$t_{ext} = qЦk_t\eta/C\rho_b, \tag{2.5}$$

где $Ц$ — количество цемента в единице объема, кг/м³; q, C и ρ_b — удельные теплоотдача, теплоемкость и плотность бетона (см. стр. 73); η — коэффициент расхода цемента, при $Ц = 300$ кг/м³ $\eta = 1$, $Ц = 150$ кг/м³ $\eta = 1{,}3$; k_t — коэффициент, зависящий от высоты блоков h_b и роста сооружения в высоту v_p: $k_t = 0{,}2$ при $h_b = 1$ м и $v_p = 1{,}8$; 10 м в месяц; $k_t = 0{,}5...0{,}8$ при $h_b = 5$ м и $v_p = 0{,}6...0{,}7$ м в месяц.

Колебания температуры наружного воздуха и воды (рис. 2.5) разделяют на сезонные с периодом $T_г = 1$ год $= 8\,760$ ч, среднемесячные с $T_{мес} = 1$ мес и

2.3. Плотность и угол внутреннего трения грунта наносов

Наносы	Плотность в сухом состоянии ρ_d, т/м³	Угол внутреннего трения φ_s, град
Песчаные и супесчаные	1,3	16...18
При полном уплотнении	1,4	20...22
Глинистые	1,3	12...14
Илистые	0,4...0,8	0

среднесуточные с $T_{сут}=1$ сут. В приближенных расчетах температуру воздуха t_a и воды t_w при сезонных колебаниях определяют по формулам

$$t_a = t_{m,a,г} + t_{o,г}\cos(2\pi\tau/T_г); \qquad (2.6)$$
$$t_w = t_{m,w,г} + t_{o,w}\cos(2\pi\tau/T_г),$$

где $t_{m,a,г}$ и $t_{m,w,г}$ — среднегодовые температуры воздуха и воды; $t_{o,г}$ и $t_{o,w}$ — амплитуды годовых колебаний температуры воздуха и воды; τ — время.

Аналогично определяют месячные и суточные температуры. Амплитуды колебаний температуры воздуха в СССР: $t_{o,г}\approx 12...22$ °С, $t_{o,мес}\approx 8...15$ °С, $t_{o,сут}\approx 7...10$ °С; среднегодовая температура воздуха $t_{m,a,г}\approx -5...+15$ °С.

В тело сооружения сезонные колебания проникают до 10...12 м, месячные — до 3 м, суточные — до 0,5 м.

Температура воды водохранилища зависит от его глубины, скорости ветра, облачности, влажности воздуха. В глубоких водохранилищах ($H\geqslant 100$ м) при поверхностных водосбросах изменение температуры происходит в «деятельном» слое глубиной до 40 м (рис. 2.5, *а*), при работающих донных водосбросах она выравнивается вследствие перемешивания воды. В неглубоких водохранилищах ($H\leqslant 40$ м) амплитуда сезонных колебаний по высоте примерно одинакова, а температура по высоте может быть постоянной.

Температура воды, фильтрующейся через песчаные насыпи, изменяется на 8...11 °С, в основании плотин на плотных глинах — примерно на 6 °С, в скальных основаниях — на 3...5 °С.

Кратковременные нагрузки и воздействия. При воздействии льда на сооружение определяют *ледовую нагрузку* для расчетной толщины его $h_д\leqslant 1{,}5$ м, ($h_д=0{,}8\,t_{max}$, t_{max} — максимальная толщина льда за зимний период 1%-ной обеспеченности), приложенную ниже расчетного уровня на $0{,}3\,h_д$. Основные расчетные случаи ледовых воздействий рассмотрены в таблице 2.4.

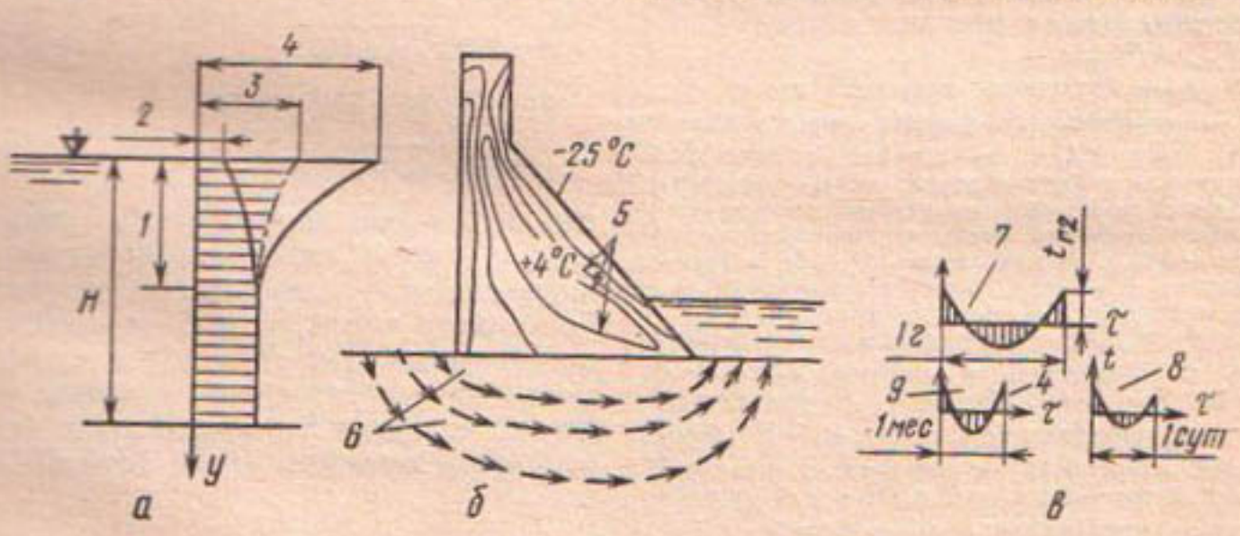


Рис. 2.5. Температурные воздействия на сооружения:

а — колебания температуры воды в водохранилище; *б* — изменения температуры сооружения и основания; *в* — колебания температуры наружного воздуха; *1* — деятельный слой; *2, 4* — средняя температура воды зимой и летом; *3* — среднегодовая температура воды; *5* — зимние изотермы в теле плотины; *6* — изотермы основания и фильтрационной воды; *7, 8, 9* — сезонные, суточные, месячные колебания температуры воздуха

От ледяных полей	От сплошного ледяного покрова при температурном расширении

На вертикальную грань отдельно стоящей опоры:

при прорезании ею льда

$F_{b,p}=\gamma_{f1}R_b b h_d$;

при остановке ледяного поля

$F_{c,p}=0{,}04\, v h_d \sqrt{\gamma_{f2} A R_b}$

На вертикальную грань секции сооружения:

при ударе льдин

$F_{c,w}=0{,}07\, v h_d \sqrt{A R_c}$;

при разрушении льда

$F_{b,w}=0{,}5\, R_c b h_d$

При движении поля под углом θ к фронту сооружения силы умножают на $\sin\theta$

На ряд вертикальных опор на расстоянии l друг от друга ($b/l=0{,}1\ldots 0{,}9$):

наименьшая из нагрузок

$F_{b,p}$; $F_{c,p}$ и $F_p=[b(1-2\gamma_{f1}k_b)/l+2\gamma_{f1}k_b]F_{b,w}$

На наклонную грань (откосный профиль), наклонную опору сооружения:

горизонтальная составляющая — наименьшая из нагрузок

$F_{b,w}$; $F_h=0{,}1\, b\gamma_t R_f h_d^2$;

вертикальная составляющая

$F_v=F_h/\gamma_t$

На наклонную грань отдельно стоящей опоры:

горизонтальная составляющая — наименьшая из $F_{b,p}$; $F_{h,p}=k_\beta\gamma_t R_f h_d^2$;

вертикальная составляющая

$F_{v,p}=F_{h,p}/\gamma_t$,

где h_d — расчетная толщина льда; γ_{f1}, γ_{f2} — коэффициенты формы опоры в плане (см. табл. 2.5); b — ширина сооружения на уровне действия льда, м; v — скорость ледяного поля, при отсутствии данных принимают скорость реки, а для водохранилищ — 3% скорости ветра 1%-ной обеспеченности в период движения льда (не более месяца); A — площадь ледяного покрова, м²; R_b, R_c — нормативные сопротивления льда смятию и сжатию, МПа (см. с. 34); k_b — коэффициент относительной ширины преграды (см. с. 34); γ_t — коэффициент, зависящий от наклона β режущей грани к горизонту (см. с. 34); R_f — нормативное сопротивление льда изгибу, МПа, $R_f=0{,}75\, R_c$; k_β — коэффициент, учитывающий вид преграды, для прямоугольных опор $k_\beta=1$ при $b/h_d<5$ и $k_\beta=0{,}2\, b/h_d$ при $b/h_d>5$, для конусообразных опор $k_\beta=1+0{,}05\, b/h_d$

Наибольшая F_t при расчетных периодах с минимальной температурой или с максимальным градиентом температур

$$F_t=h_{\max}k_l(0{,}05+11\cdot 10^{-5}v_{t,a}\eta\varphi),$$

где $h_{\max}$ — наибольшая толщина льда 1%-ной обеспеченности, м; k_l — коэффициент протяженности ледяного поля $k_l=1$, 0,9, 0,8, 0,7 и 0,6 при протяженности ледяного поля 50 м и менее, 70, 90, 120, 150 м и более; $v_{t,a}$ — максимальная скорость повышения температуры воздуха (°С) за время τ (ч) (любые 6 ч в сутки); η — коэффициент вязкости льда, МПа·ч

при $t_d\geqslant -20$ °С

$\eta=(3{,}3-0{,}28\, t_d+0{,}083\, t_d^2)10^2$;

при $t_d<-20$ °С

$\eta=(3{,}3-1{,}85\, t_d)10^2$,

t_d — температура льда, °С, $t_d=t_a h_{\max}/h_{red}+0{,}5\,\psi\, v_{t,a}$, t, t_a — температура воздуха в момент начала повышения температуры, °С; h_{red} — приведенная толщина льда

$$h_{red}=h_{\max}+1{,}43\, h_{s,\min}+2{,}3/\alpha,$$

где $h_{s,\min}$ — наименьшая толщина снега за расчетный период, м; при отсутствии данных равна 0; α — коэффициент теплоотдачи от воздуха к поверхности снега, Вт/м²:

при наличии снега

$\alpha=23\sqrt{v_{v,m}+0{,}3}$;

при отсутствии снега

$\alpha=6\sqrt{v_{v,m}+0{,}3}$,

где $v_{v,m}$ — средняя скорость ветра, м/с; φ — коэффициент температурной нагрузки; ψ — коэффициент скорости повышения температуры, определяют по графикам (см. рис. 2.6) в зависимости от относительной толщины ледяного покрова $h_{rel}=h_{\max}/h_{red}$ и безразмерной величины $F=4\cdot 10^{-3}\,\tau/h^2_{red}$

сооружения, МН

От зажорных масс льда	От примерзшего к сооружению льда при изменении уровня воды

При прорезании опорой зажорной массы

$$F_{b,l}=0{,}12\,\gamma_{fl}bh_l$$

При навале зажорных масс:

перпендикулярно фронту сооружения

$$F_{s,l}=lL_l(2\cdot10^{-3}v_w^2+0{,}05\,h_dv_w^2/L_m+0{,}92\,h_di_d+2\cdot10^{-6}v_v^2)\,10^{-2};$$

на сооружение, параллельное течению, или при навале на берега

$$F_q=\xi F_{s,l}/l,$$

где h_l — толщина зажора, м; L_l — длина участка зажора, принимаемая равной полуторной ширине реки, м; l — длина сооружения на уровне воздействия зажорных масс, м; L_m — средняя длина ледяного поля, при отсутствии данных равна трем ширинам реки, м; v_w и v_v — скорость воды 1%-ной обеспеченности и ветра при зажоре, м/с; i_d — уклон водной поверхности в месте зажора по данным натурных наблюдений; ξ — коэффициент навала, равный для песчаных берегов 0,7, для глинистых — 0,8, для скальных — 0,9

Вертикальная на сооружение

$$F_d=20\,lv_d\tau_d\sqrt[4]{h^3_{max}/\Phi}$$

Вертикальная на отдельную опору или свайный куст

$$F_{d,p}=k_fR_fh^2_{max},$$

где v_d — скорость изменения уровня воды, м/ч; τ_d — время деформации льда при этом изменении, ч; Φ — функция времени

$$\Phi=1+3\cdot10^2[\tau_d+50(1-e^{-0{,}4\tau_d})]/\eta,$$

где k_f — безразмерный коэффициент, зависящий от отношения d/h_{max} (см. с. 34); d — диаметр опоры (для прямоугольной опоры со сторонами a и b, м, $d=\sqrt{ab}$)

Используемые в расчетных формулах коэффициенты формы γ_{f1} и γ_{f2} приведены в таблице 2.5.

2.5. Коэффициенты формы γ_{f1} и γ_{f2} для нагрузки от ледовых полей

Коэффициенты формы	Форма опоры в плане								
	многогранник и полуциркуль	прямоугольник	треугольники с углом заострения в плане, град					
			45	60	75	90	120	150
γ_{f1}	0,90	1,0	0,54	0,59	0,64	0,69	0,77	1,0
γ_{f2}	2,4	2,7	0,2	0,5	0,8	1,0	1,3	2,7

Сопротивление льда сжатию R_c изменяется в зависимости от среднесуточной температуры воздуха $t_{a,m}$ следующим образом (ориентировочно):

$t_{a,m}$, °С	0	—3	—15	—30
R_c, МПа	0,45	0,75	1,20	1,50

Коэффициент относительной ширины преграды k_b для определения сопротивления льда смятию $R_b = k_b R_c$ при различных соотношениях b/h_d принимает следующие значения:

b/h_d	1	3	10	20	30	50
k_b	2,5	2	1,5	1,2	1	0,5

Коэффициент γ_t, учитывающий влияние наклона режущей грани к горизонту β, равен

β, град	15	30	45	60	75	80	85
γ_t	0,3	0,6	1,0	1,7	3,7	5,6	18

Коэффициент k_f для различных соотношений размера опоры и максимальной толщины льда приведен ниже.

d/h_{max}	0,1	0,2	0,5	1	2	3	5	10	20
k_f	0,16	0,18	0,22	0,26	0,31	0,36	0,43	0,63	1,11

Графики $\varphi = f(F, h_{rel})$ и $\psi = f(F, h_{rel})$ даны на рисунке 2.6.

Давление стоячих волн p_w (горизонтальное) на сооружения вертикального профиля при глубине до дна $d > 1{,}5\,h$ (h — высота волны):

для мелководной зоны p_w, кПа определяют по таблице 2.6, коэффициенты k_2, k_3, k_4, k_5, k_8, k_9 принимают по рисунку 2.7. Возвышение гребня волны над расчетным уровнем η_c определяют по формуле

$$\eta_c = + \frac{\lambda_m}{\pi (3 - 8\pi d/\lambda_m)} \left[1 - \frac{0{,}5k \operatorname{cth} kd}{3 - 8\pi d/\lambda_m} \right], \qquad (2.7)$$

где λ_m — средняя длина волны; k — волновое число, $k = 2\pi/\lambda_m$.

Положение подошвы волны ниже расчетного уровня

$$\eta_t = h - \frac{kh^2}{2} \operatorname{cth} kd; \qquad (2.8)$$

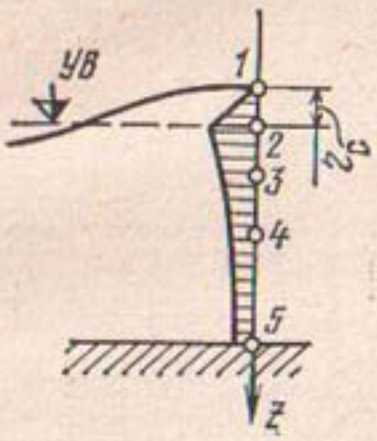
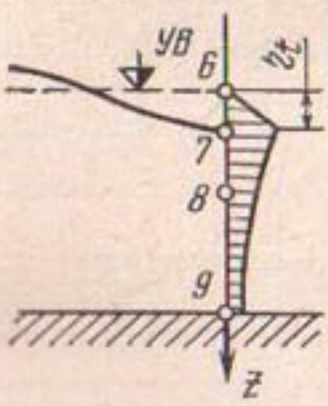
для глубоководной зоны p_w рассчитывают по зависимости

$$p_w = \rho_w g h \left[e^{-kz} \cos \omega t - \frac{kh}{2} e^{-2kz} \cos^2 \omega t - \right.$$

$$\left. - \frac{kh}{2} (1 - e^{-2kz}) \cos 2\omega t - \frac{k^2 h^2}{2} e^{-3kz} \cos 2\omega t \cos \omega t \right], \qquad (2.9)$$

где z — ординаты расчетных точек (см. эпюры давлений в таблице 2.7); ω — частота волны, $\omega=2\pi/T_m$ (T_m — средний период волны в зоне, определяют по верхней огибающей кривой рисунка 2.8); t — время. При $z_1=\eta_c$ (для гребня) и при $z_6=0$ (для ложбины) $p_w=0$.

2.6. Волновое давление стоячих волн на сооружение в мелководной зоне

Эпюра давления	Заглубление точек z, м	Волновое давление, кПа
При подходе гребня		
	η_c 0 0,25 d 0,5 d d	$p_1=0$ $p_2=k_2\rho_w g h$ $p_3=k_3\rho_w g h$ $p_4=k_4\rho_w g h$ $p_5=k_5\rho_w g h$
При подходе ложбины		
	0 η_t 0,5 d d	$p_6=0$ $p_7=-g\rho_w\eta_t$ $p_8=-k_8\rho_w g h$ $p_9=-k_9\rho_w g h$

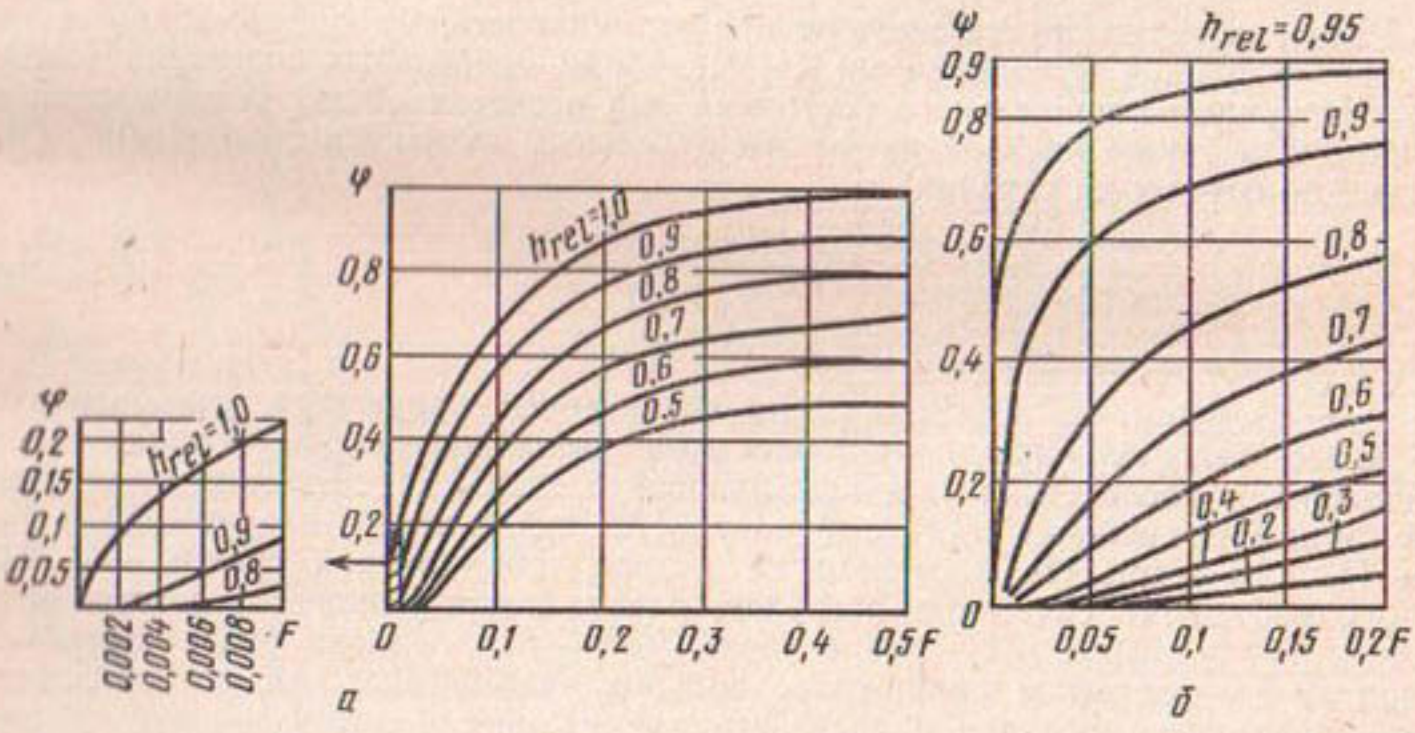


Рис. 2.6. Графики значений φ (*а*) и Ψ (*б*) для температурного расширения льда в зависимости от его толщины h_{rel} и функции $F=4\cdot10^{-3}\,t/h^2_{red}$

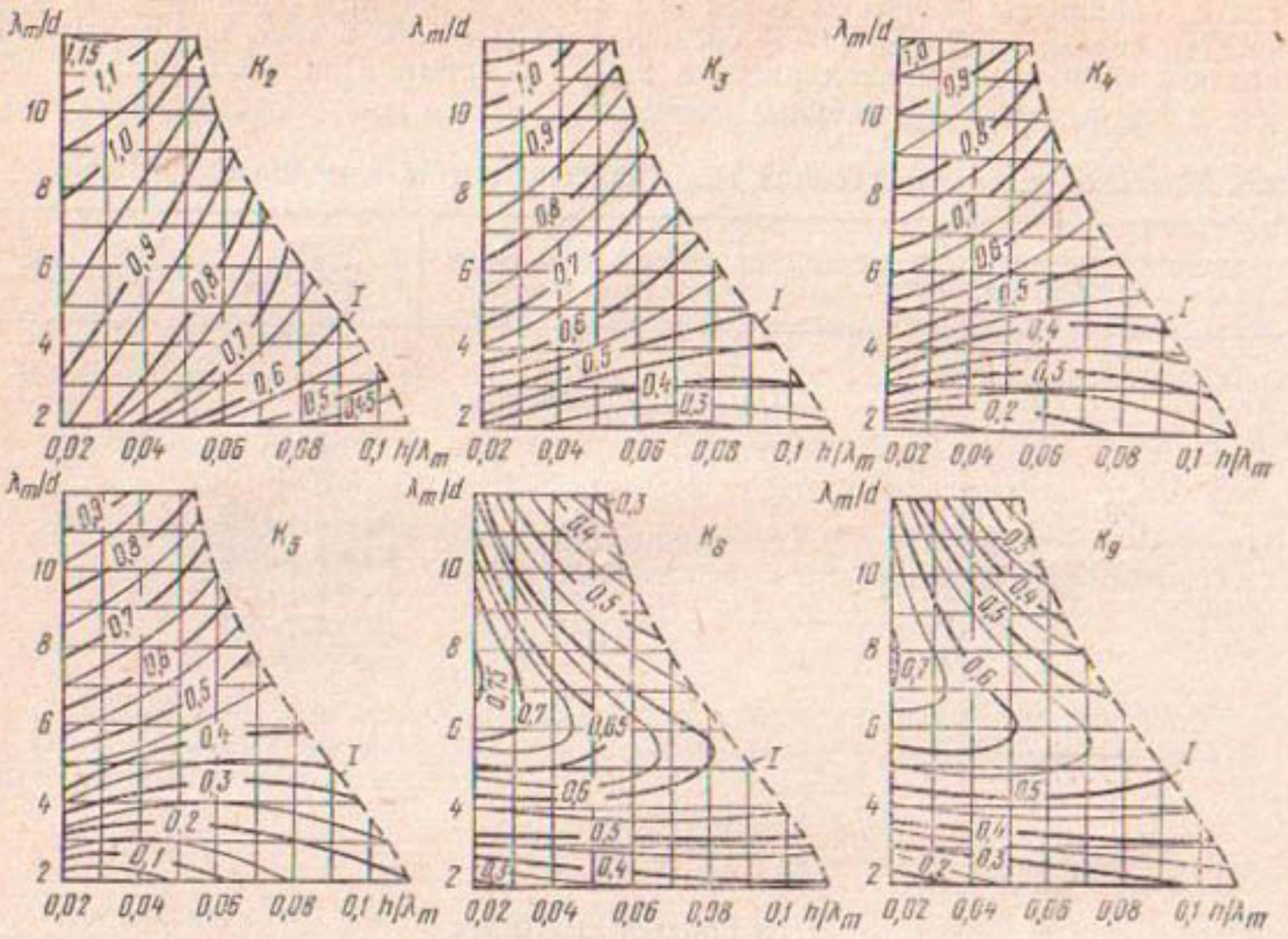


Рис. 2.7. Значения коэффициентов k_2, k_3, k_4, k_5, k_8, k_9 при определении волнового воздействия на плотину в мелководной зоне:
λ_m — средняя длина волны; d — глубина потока; h — высота волны; I — граница разрушения стоячих волн

2.3. РАСЧЕТ ГИДРОТЕХНИЧЕСКИХ СООРУЖЕНИЙ ПО ПРЕДЕЛЬНЫМ СОСТОЯНИЯМ

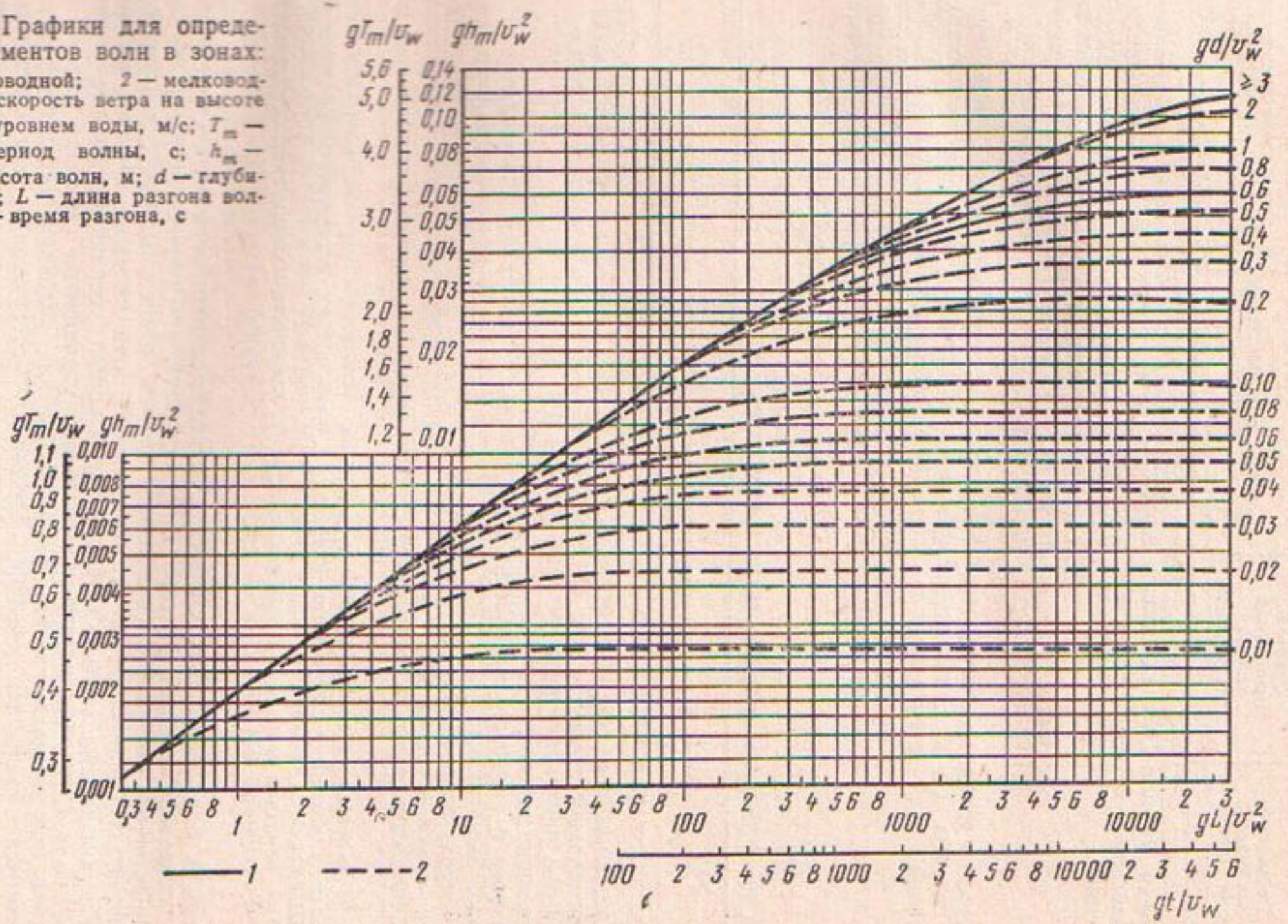
Расчет сооружений на прочность и устойчивость, по деформациям и по раскрытию трещин выполняют по двум группам предельных состояний (табл. 2.7). Наступление предельного состояния при расчетах общей устойчивости и прочности, а также местной прочности отдельных элементов сооружений оценивают по одному из условий

$$\gamma_n \gamma_{lc} F \leqslant \gamma_{cd} R;$$

$$\gamma_n \gamma_{lc} \sigma \leqslant \gamma_{cd} \Phi (R_b, R_s), \qquad (2.10)$$

где γ_n — *коэффициент надежности по назначению сооружения*, учитывающий его класс, недостаточную изученность действительной работы сооружений и оснований и последствия при наступлении предельных состояний, для первой группы предельных состояний равен 1,25 при I классе сооружений, 1,2— при II, 1,15 — при III, 1,1 — при IV классе, для второй группы — $\gamma_n = 1$; γ_{lc} — коэффициент сочетания нагрузок, равен 1 для основного сочетания в период эксплуатации, 0,9 — для особого, 0,95 — для периода строительства и ремонта; F — расчетное обобщенное силовое воздействие, при его определении нормативные нагрузки и воздействия умножают на *коэффициент надежности по нагрузке* γ_f (табл. 2.8), учитывающий возможное отклонение нагрузок в неблагоприятную сторону; γ_{cd} — коэффициент условий работы сооружений, учитывающий особенности работы сооружения, его элементов и ос-

Рис. 2.8. Графики для определения элементов волн в зонах: *1* — глубоководной; *2* — мелководной; v_w — скорость ветра на высоте 10 м над уровнем воды, м/с; T_m — средний период волны, с; h_m — средняя высота волн, м; d — глубина воды, м; L — длина разгона волны, км; t — время разгона, с



2.7. Характеристика предельных состояний сооружений

Расчетное состояние сооружения	Степень нарушения условий эксплуатации	Причины возникновения	Оцениваемые при расчете факторы
Первая группа предельных состояний	Полная непригодность к эксплуатации	Хрупкое, усталостное или пластическое разрушение материала сооружений или основания, крупные трещины и т. д.	Потеря основанием несущей способности, сооружением устойчивости; нарушение общей и местной фильтрационной прочности
Вторая группа предельных состояний	Непригодность к нормальной эксплуатации	Увеличение фильтрации и противодавления; раскрытие трещин; недопустимые деформации и т. п.	Опасные перемещения и наклоны; нарушение местной устойчивости из-за неблагоприятной фильтрации; потеря устойчивости склонов

2.8. Коэффициент надежности по нагрузке γ_f

Нагрузки и воздействия	γ_f
Собственный вес сооружения	1,05(0,95)
Вертикальное давление веса грунта	1,1(0,9)
Боковое давление грунта	1,2(0,8)
Давление наносов	1,2
Силовое и волновое воздействие воды	1,0
Ледовые нагрузки	1,1
Температурно-влажностные воздействия	1,1
Сейсмические воздействия	1,0
Нагрузки от судов	1,2

Примечания. 1. Значения γ_f в скобках относятся к случаям, когда применение минимального коэффициента приводит к невыгодному загружению сооружения. 2. При расчетах общей прочности и устойчивости плотин γ_f для нагрузок от веса сооружения, давления грунта, а также температурных, влажностных и динамических воздействий принимают равным 1.

нования, вид предельного состояния, приближенность расчетных схем, перераспределение силовых факторов и деформаций, при расчете бетонных и железобетонных плотин γ_{cd} (для первой группы предельных состояний принимают по таблице 2.9, для второй — $\gamma_{cd}=1$), при расчетах арочных плотин γ_{cd} умножают на соответствующий коэффициент условий их работы (табл. 2.10), для грунтовых плотин $\gamma_{cd}=0{,}95$ при упрощенных методах расчета и $\gamma_{cd}=1$ при методах расчета, удовлетворяющих условиям равновесия; R — расчетная обобщенная несущая способность сооружения или основания; σ — нормальное напряжение; Φ — функция, зависящая от напряженно-деформированного состояния сооружения; R_b — расчетное сопротивление бетона (см. табл. 2.37, 2.38); R_s — расчетное сопротивление арматуры (см. табл. 2.42, 2.43).

При технико-экономическом сравнении вариантов плотин и других сооружений, оценке несущей способности по данным расчетов и модельных исследований используют понятие обобщенного коэффициента запаса

$$k_s = \gamma_{lc}\gamma_n/\gamma_{cd}. \qquad (2.11)$$

2.9. Коэффициент условий работы бетонных и железобетонных плотин γ_{cd} для первого предельного состояния

Вид расчетов	γ_{cd}
Расчеты устойчивости плотин на нескальных основаниях	1,0
Расчеты устойчивости гравитационных и контрфорсных плотин на скальных основаниях для поверхностей сдвига, проходящих:	
по трещинам в массиве основания	1,0
по контакту бетон — скала и в массиве основания частично по трещинам, частично по монолиту	0,95
Расчет береговых примыканий арочных плотин	0,75
Расчет устойчивости подпорных стенок:	
на сдвиг	1,0
на опрокидывание и всплытие	0,9
Расчеты общей и местной прочности для случаев, когда определяющей является прочность бетона в конструкциях:	
бетонных	
для основного сочетания нагрузок	0,9
для особых сочетаний без сейсма	1,0
для особых сочетаний с учетом сейсма	1,1
железобетонных — плитных и ребристых	
при толщине плиты (ребра) $\geqslant$60 см	1,15
при толщине плиты (ребра) менее 60 см	1,0
То же, когда определяющей является прочность ненапрягаемой арматуры:	
железобетонных элементов	1,1
сталежелезобетонных конструкций	0,8

2.10. Коэффициент условий работы арочных плотин γ_{cda}

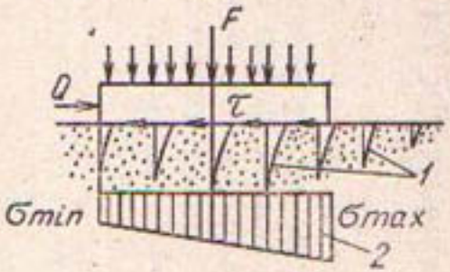
Вид расчетов	γ_{cda}
Расчеты общей прочности:	
по растяжению	2,4
по сжатию	0,9
Расчеты устойчивости:	
береговых упоров для основного и особых сочетаний нагрузок без сейсма	1,0
общей устойчивости плотин в широких створах при основном и особых сочетаниях нагрузок без сейсма	1,1
береговых упоров и общей устойчивости плотин при сейсме	1,1

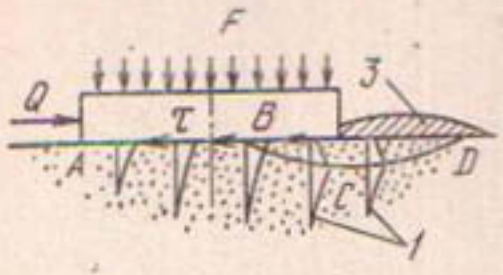
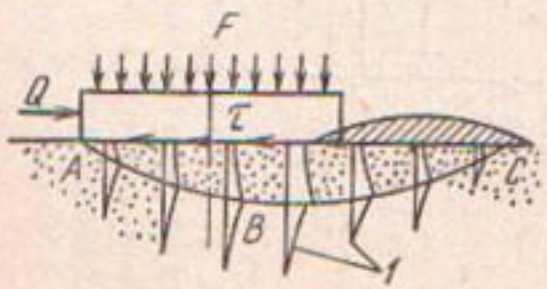
2.4. РАСЧЕТ УСТОЙЧИВОСТИ СООРУЖЕНИЙ

Расчеты устойчивости сооружений на сдвиг на нескальных основаниях. Выполняют их по первому предельному состоянию с целью обеспечения несущей способности основания. В состоянии предельного равновесия на всем протяжении рассматриваемой поверхности сдвига справедливо некоторое условие прочности, в качестве которого часто принимают уравнение Кулона — Мора:

$$\tau_{lim} = \sigma \operatorname{tg} \varphi + c,$$

2.11. Схема сдвига плотин на нескальных основаниях

Схема сдвига	Область проявления, характер деформаций	Критерий сдвига	Расчетные зависимости для сдвигающих сил и предельного сопротивления сдвигу
Плоский сдвиг 	Поверхность опирания сооружения Области пластических деформаций отсутствуют или незначительны	Для оснований песчаных, крупнообломочных, твердых и полутвердых глинистых $N_\sigma = \sigma_{max}/\gamma B \leqslant$ Б, для пластичных, туго- и мягкопластичных глин дополнительно должны выполняться условия $\operatorname{tg}\psi_1 = \operatorname{tg}\varphi_1 + c_1/\sigma_m \geqslant 0{,}45$, $c^0_v = \dfrac{k(1+e)\,t_0}{a\gamma_w h^2_0} \geqslant 4$, где N_σ — число моделирования; σ_{max} и σ_m — наибольшее и среднее нормальные напряжения; B — ширина подошвы сооружения без учета анкерного понура; Б — безразмерный критерий, равен 1 для плотных песков и 3 — для всех остальных грунтов, для сооружений I и II классов уточняется на основе экспериментальных данных; ψ_1 — коэффициент сдвига; $\operatorname{tg}\varphi_1$ и c_1 — внутреннее трение и сцепление (табл. 1.9, 1.10); a — коэффициент степени консолидации; t_0 — время возведения сооружения; h_0 — толщина консолидируемого слоя (см. табл. 2.12); γ и γ_w — удельный вес грунта и воды; k и e — коэффициенты фильтрации и пористости грунта	Для основных 00 и поверочных 0′0′ плоскостей сдвига обобщенная сдвигающая сила равна $F_h = F_{h,вБ} + p_{a,в} - F_{h,нБ}$ Сила предельного сопротивления равна $R_{пл} = F_v \operatorname{tg}\varphi_1 + \gamma_{cd} p_{p,н} + Bc_1$, где $F_{h,вБ}$, $F_{h,нБ}$ — суммы горизонтальных составляющих активных сил со стороны верховой и низовой грани; F_v — сумма вертикальных составляющих расчетных нагрузок, включающих фильтрационное давление; γ_{cd} — коэффициент условий работы, для пассивного давления равен 0,7; $p_{a,в}$, $p_{p,н}$ — расчетное активное давление с верховой и пассивное с низовой стороны сооружения. Для наклонной плоскости сдвига все силы проектируют на эту плоскость и нормаль к ней. Плоский сдвиг с поворотом $R_{пл,п} = \alpha_n R_{пл}$, где α_n — безразмерный коэффициент плоского сдвига с поворотом (см. рис. 2.11)

Смешанный сдвиг  	Поверхность опирания сооружения с частичным выпором грунта в НБ. Увеличенные зоны пластических деформаций у краев, особенно у низовой грани	Несоблюдение приведенных выше условий на неоднородных основаниях, несущих вертикальные и горизонтальные нагрузки	При эксцентриситете e_p нормальной силы F_v в сторону ВБ или отсутствии эксцентриситета (случай а): $\sigma_m = F_v/BL$ $R_{см} = (\sigma_m \operatorname{tg} \varphi_I + c_1) B_2 L + \tau_{IIm} B_1 L$ При e_p в сторону НБ (случай б): $\sigma_m = F_v/B^* L$ $R_{см} = (\sigma_m \operatorname{tg} \varphi_I + c_1) B_2^* L + \tau_{IIm} B_1^* L$ Смешанный сдвиг с поворотом $R_{см,п} = \alpha_n R_{см}$, где τ_{IIm} — предельное касательное напряжение на участке сдвига с выпором; B_1 и B_1^*, B_2 и B_2^* — ширины участков подошвы соответственно со сдвигом с выпором и плоским сдвигом; L — протяженность подошвы перпендикулярно чертежу
Глубинный сдвиг  	Выпор грунта под всей подошвой сооружения. Значительное развитие пластических деформаций	Несоблюдение вышеприведенных условий на однородных и неоднородных основаниях, несущих только вертикальную нагрузку	$R_{гл}$ — определяется специальными расчетами

Примечание. *1* — горизонтальные перемещения; *2* — эпюра нормальных напряжений; *3* — выпор.

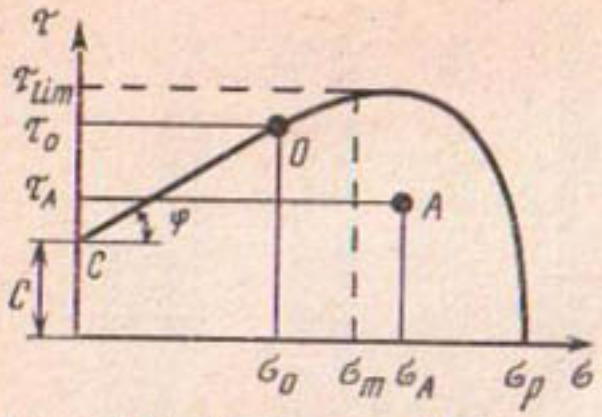


Рис. 2.9. Кривая $\tau=f(\sigma)$, характеризующая предельное состояние грунта:

τ_{lim}, τ_O, τ_A — касательное напряжение, предельное в точках О и А; σ_m, σ_p, σ_O, σ_A — нормальное напряжение среднее, разрушающее, в точках О и А; φ — угол внутреннего трения; c — сцепление грунта

где φ и c — угол внутреннего трения и удельное сцепление грунта; τ_{lim} и σ — касательные (предельные) и нормальные напряжения. Зависимость $\tau=f(\sigma)$, характеризующая предельное равновесие грунта, приведена на рисунке 2.9. Участок СО (прямолинейный) характеризует диапазон напряжений, отвечающий условиям плоского сдвига. При $\sigma<\sigma_0$ происходит плоский сдвиг; при $\sigma_A<\sigma_{разр}$ и $\tau_A<\tau_{lim}$ исключена возможность местного выпора грунта.

Расчеты устойчивости выполняют по зависимости (2.10), где F и R — расчетные значения соответственно обобщенной сдвигающей силы и силы предельного сопротивления. Если размеры сооружения определяются требованием устойчивости, то допускается превышение правой части над левой до 3%.

Схемы сдвига сооружений на нескальных основаниях, критерии их оценки и основы расчета величин, входящих в зависимость (2.10), приведены в таблице 2.11. Толщину консолидируемого слоя h_0 определяют расчетом по формулам таблицы 2.12. Ширину подошвы фундамента B_1, на котором происходит сдвиг с выпором, находят с помощью графиков, приведенных на рисунке 2.10 по значению σ_m. Ширина участка B_2, на котором происходит плоский сдвиг, равна $B-B_1$. Соответствующие значения B^*_1 и B^*_2 равны: $B^*_1=B_1B^*/B$; $B^*_2=B^*-B^*_1$.

Для определения безразмерного коэффициента смешанного сдвига с поворотом α_n рекомендуют зависимости, приведенные на рисунке 2.11.

Расчеты устойчивости откосов грунтовых плотин всех классов. Выполняют их для круглоцилиндрических поверхностей сдвига методами, удовлетворяющими условиям равновесия призмы обрушения и ее элементов в предельном состоянии и учитывающими напряженное состояние сооружения и его основания. При ослабленных зонах и прослойках грунта в основании или теле сооружения, при оценке устойчивости экрана или защитного слоя и т. д. расчеты выполняют для произвольных поверхностей сдвига.

Критерием устойчивости грунтовых откосов является соблюдение для наиболее опасной призмы обрушения неравенства

$$\gamma_n\gamma_{lc}F(\gamma_f)\leqslant\gamma_{cd}R/\gamma_g, \qquad (2.12)$$

где F, γ_n, γ_{lc}, γ_{cd} имеют те же значения, что и в формуле (2.10); R — обобщенное расчетное значение сил предельного сопротивления сдвигу по по-

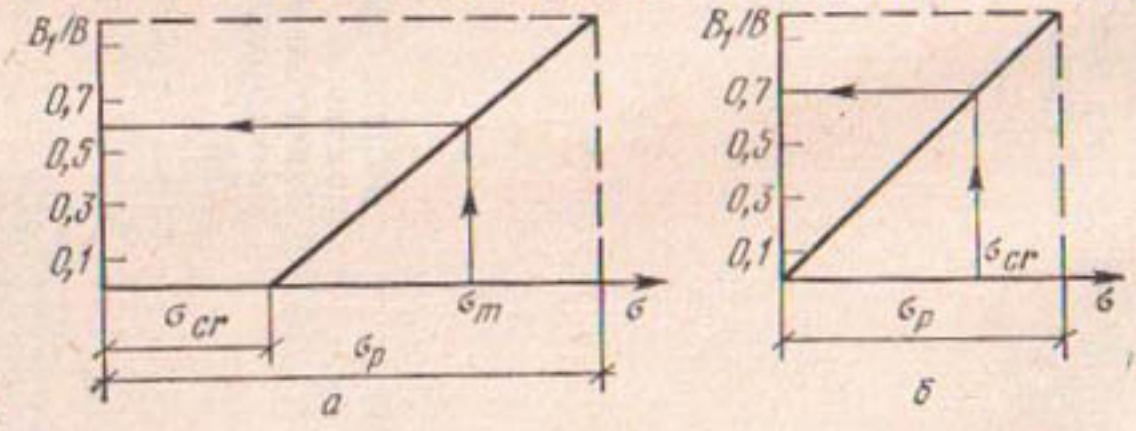


Рис. 2.10. Зависимость $B_1/B=f(\sigma)$ относительной ширины участка сдвига с выпором грунта основания от нормального напряжения:

а — для грунтов с $\operatorname{tg}\psi_I=\operatorname{tg}\varphi_I+c_I/\sigma_m>45$; *б* — для грунтов с $\operatorname{tg}\psi_I<0{,}45$; σ_{cr} — предельное напряжение при плоском сдвиге; σ_m — среднее напряжение при сдвиге с выпором; σ_p — разрушающее напряжение.

2.12. Толщина консолидируемого слоя h_0

Тип основания	Расчетная формула
Однослойное, водоупор на глубине $d_1 \leqslant H_c$ (H_c — глубина сжимаемой толщи)	$h_0 = d_1 + 0{,}5(B - b_d)$ (b_d — ширина участков с дренажем)
Дренирующий слой на глубине $d_1 \leqslant H_c$	$h_0 = 0{,}5\, d_1 + 0{,}5(B - b_d)$
Двухслойное с толщиной слоев d_1 и d_2 $(d_1 + d_2 \leqslant H_c)$, $k_1 \approx k_2$	$h_0 = (d_1 + d_2) + 0{,}5(B - b_d)$
То же при дренирующем слое на глубине $d_1 + d_2$	$h_0 = 0{,}5(d_1 + d_2) + 0{,}5(B - b_d)$

верхности обрушения [см. формулу (2.23)]; γ_g — коэффициент надежности по грунту.

Расчеты устойчивости сооружений на скальных основаниях. Проводят их для схем сдвига по плоским и более сложным поверхностям (табл. 2.13). В расчетах по схеме плоской поверхности сдвига используют основную расчетную зависимость (2.10), в которой F и R определяют по формулам

$$F = F_{s,a} \quad (2.13); \qquad R = \sum_{i=1}^{n} (N_i \operatorname{tg} \varphi_{\mathrm{I},i} + c_{\mathrm{I},i} A_i) + \gamma_c' F_u, \quad (2.13')$$

где $F_{s,a}$ — активная сдвигающая сила, составляющая равнодействующей расчетной нагрузки в направлении сдвига; n — число участков поверхности сдвига, назначенное с учетом неоднородности основания по прочностным и деформационным свойствам; N_i — равнодействующая нормальных сил на i-м участке поверхности сдвига; A_i — площадь i-го участка поверхности сдви-

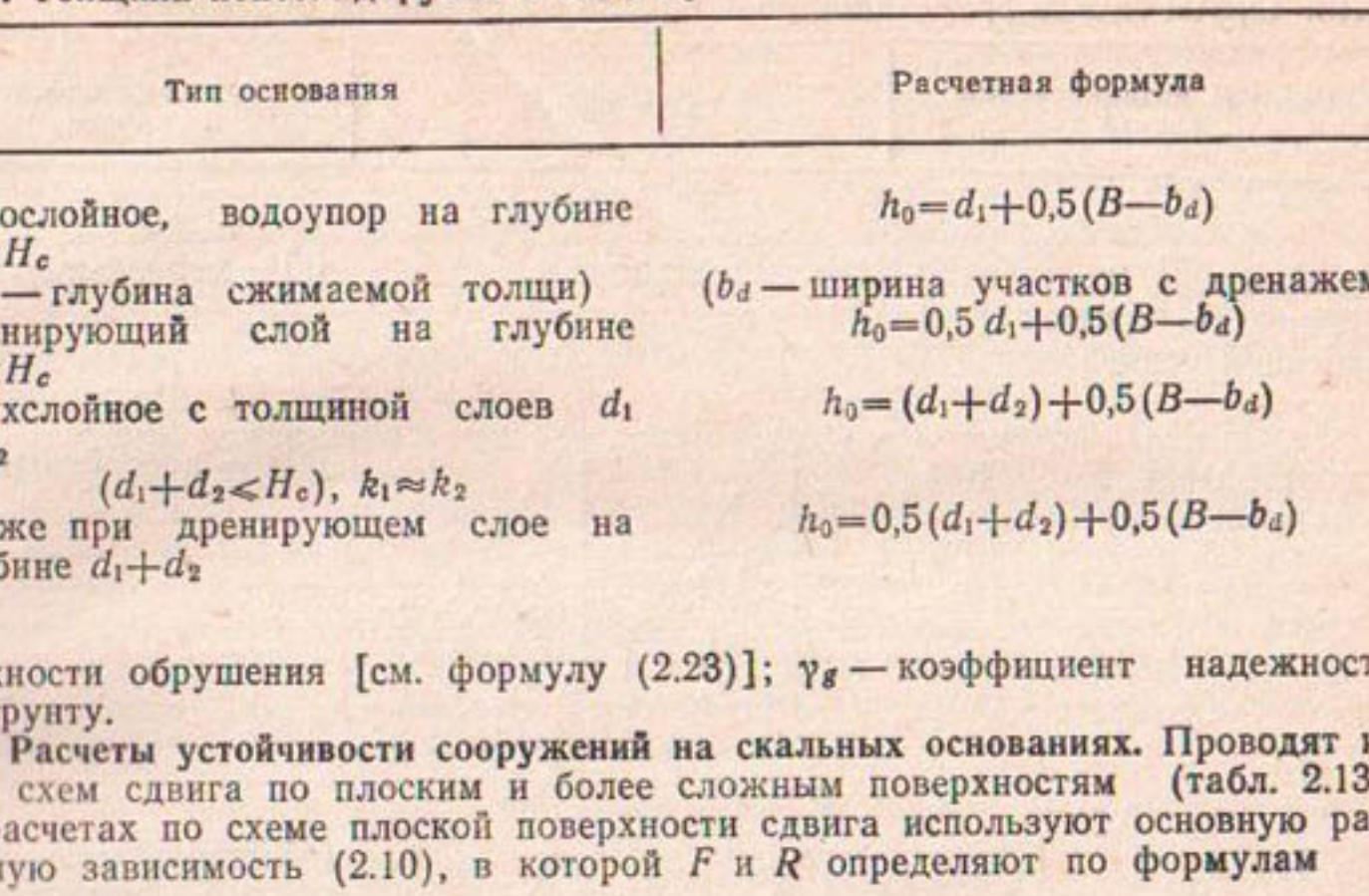
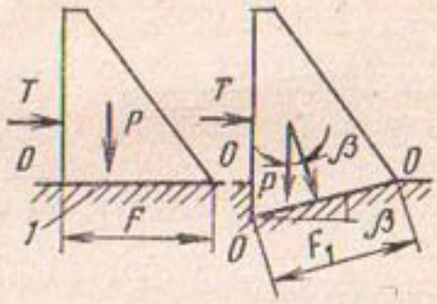
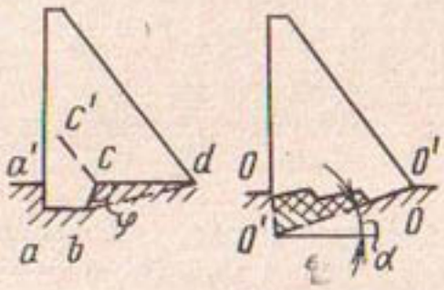
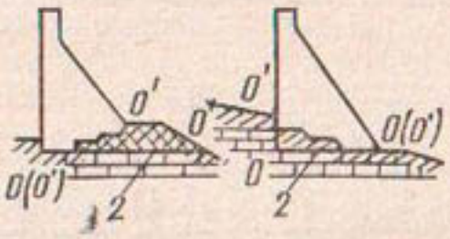
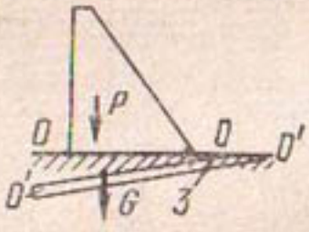
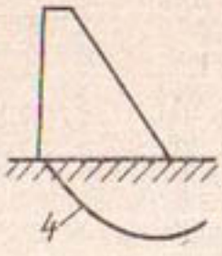


Рис. 2.11. К расчету устойчивости сооружений неглубокого заложения при сдвиге с поворотом:

а — расчетная схема; *б* — графики для определения коэффициента плоского сдвига a_n и координаты центра поворота n; B, L — ширина и длина подошвы сооружения; $\tau_1, \ldots, \tau_4$ — касательные напряжения по контуру; θ, r — угол наклона и расстояние до площадки с предельным напряжением τ_{lim}; e — эксцентриситет горизонтальной составляющей нагрузки F_h; R — предельное сопротивление основания; C — центр поворота

2.13. Схемы сдвига гравитационных плотин на скальных основаниях

Условия возникновения сдвига	Схема сдвига	Расчетные плоскости сдвига
Однородное, достаточно прочное по сравнению с плотиной основание:	Плоский сдвиг	00 — основные
горизонтальное или наклонное		$0^1 0^1$ — поверочные
с зубом		Обязательны поверочные расчеты по пологопадающим трещинам; прослойкам с пониженными сдвиговыми характеристиками
или зубчатое		
низкие сдвиговые характеристики на контакте плотина — основание		
Высокие плотины на основаниях небольшой прочности, раздробленной структуры, тонкослоистых; в узких ущельях и т. п.	Сдвиг с захватом основания 	

Примечание. *1* — поверхность скалы; *2* — плоскость смещения; *3* — слабая прослойка; *4* — поверхность сдвига.

га; γ'_c — коэффициент условий работы; F_u — сила сопротивления упорного массива скальных грунтов или обратной засыпки, ее принимают равной силе активного давления $P_{g,a}$ при значениях $\operatorname{tg}\varphi_1$, c_1 и модуля деформации засыпки (упора) меньше, чем для основания, на 20%, при этом $\gamma'_c=1$. В остальных случаях $F_u=P_{g,p}$, $\gamma'_c=0{,}7$. Значения $\operatorname{tg}\varphi_1$ и c_1 приведены в таблице 1.7.

По формулам (2.10), (2.13) проверяют также устойчивость скальных склонов. Расчет по схеме сдвига с поворотом в плане выполняют аналогично плотинам на нескальном основании.

Расчет устойчивости сооружений и скальных склонов выполняют сейчас также методами, основанными на анализе напряженного состояния и прочности контактной зоны.

Расчеты устойчивости на опрокидывание и всплывание. В таких сооружениях, как гравитационные плотины необжатого профиля, при отсутствии растягивающих напряжений по контакту условие устойчивости на опрокидывание обычно выполняется, и специальные расчеты необязательны. Для сооружений обжатого профиля, на верховой грани которых при наличии водонепроницаемого экрана допускаются растягивающие напряжения, для плотин с предварительным обжатием и подпорных стенок на скальном основании (иногда и на нескальном) выполняют поверочные расчеты на опрокидывание вокруг низового ребра, исходя из условия

$$\gamma_{lc}\Sigma M_a \leqslant \gamma_{cd}\Sigma M_r/\gamma_n, \qquad (2.14)$$

где ΣM_a — сумма моментов активных сил относительно низового ребра; ΣM_r — сумма моментов сил, удерживающих от вращения, в заанкеренных плотинах в сумму входит усилие в анкере.

При расчете на всплывание низких флютбетов, когда напор поддерживается в основном затворами и порог отрезан от боков швами, проверяют условие

$$\gamma_{lc}P_{con} \leqslant \gamma_{cd}F_r/\gamma_n, \qquad (2.15)$$

где P_{con} — силовое воздействие воды (противодавление) вычисляют по формуле (2.1); F_r — удерживающая сила.

2.5. РАСЧЕТЫ ПРОЧНОСТИ БЕТОННЫХ СООРУЖЕНИЙ

Расчеты общей прочности бетонных плотин, как правило, выполняют *на полный состав нагрузок и воздействий* основных и особых сочетаний методами теории упругости с учетом возможного раскрытия строительных швов на низовой грани. При этом рассматривают два расчетных случая: *начальный период* эксплуатации (остывание сооружения до среднемноголетних эксплуатационных температур еще не произошло) и *установившийся период* эксплуатации (сооружение остыло до среднемноголетних температур). *Особенности расчетов:* в температурных воздействиях учитывают изменение температуры сооружения с учетом начального режима твердения бетона, температуры замыкания строительных швов, полного остывания бетона до среднемноголетних температур, сезонных колебаний температуры наружного воздуха и воды водохранилища, эксплуатационного подогрева сооружения; силовое воздействие фильтрующейся воды принимают в виде объемных и поверхностных сил; сейсмические воздействия определяют по СНиП II-7—81; при обосновании учитывают набухание бетона верховой грани; общую прочность и устойчивость проверяют обычно для февраля и августа.

Прочность плотин I и II классов проверяют экспериментальными исследованиями, для плотин III и IV классов их проведение требует специального обоснования.

Расчеты прочности *на сокращенный состав нагрузок и воздействий* с использованием упрощенных методов строительной механики допускают при проектировании плотин высотой менее 60 м и на начальных стадиях проектирования плотин высотой более 60 м при амплитуде колебаний температур

2.14. Условия прочности у верховых граней плотин всех типов и боковых граней массивно-контрфорсных плотин

Расчетные сечения	Полный состав нагрузок		Сокращенный состав нагрузок	
	основное сочетание	особые сочетания	основное сочетание	особые сочетания
Гравитационные плотины без расширенных швов				
Горизонтальные сечения: без гидроизоляционного экрана верховой грани	$d_t \leqslant \min \begin{cases} 0{,}5\ a_1 \\ 0{,}133\ b_d \end{cases}$	$\dfrac{d_t \leqslant 0{,}167\ b_d}{d_t \leqslant 0{,}286\ b_d}$	$\sigma_y^u < 0$ $\lvert\sigma_y^u\rvert \geqslant 0{,}25\ \gamma_w H_d^u$	$\dfrac{d_t \leqslant 0{,}133\ b_d}{d_t \leqslant 0{,}286\ b_d}$
с гидроизоляционным экраном верховой грани	$d_t < 0{,}167\ b_d$	$\dfrac{d_t \leqslant 0{,}2\ b_d}{d_t \leqslant 0{,}286\ b_d}$	$d_t < 0{,}133\ b_d$	$\dfrac{d_t \leqslant 0{,}167\ b_d}{d_t \leqslant 0{,}286\ b_d}$
Контактное сечение: без гидроизоляции контакта плотина — основание	$d_t < 0{,}3\ a_2$	$\dfrac{d_t \leqslant 0{,}083\ b}{d_t \leqslant 0{,}2\ b}$	$\sigma_c^u < 0$	$\dfrac{d_t \leqslant 0{,}3\ a_2}{d_t \leqslant 0{,}2\ b}$
с гидроизоляцией контакта плотина — основание	$d_t < 0{,}083\ b$	$\dfrac{d_t \leqslant 0{,}125\ b}{d_t \leqslant 0{,}2\ b}$	$d_t < 0{,}071\ b$	$\dfrac{d_t \leqslant 0{,}083\ b}{d_t \leqslant 0{,}2\ b}$
Гравитационные плотины с расширенными швами				
Горизонтальные сечения	$d_t \leqslant \min \begin{cases} 0{,}5\ \eta a_1 \\ 0{,}5\ \eta b_h \\ 0{,}133\ \eta b_d \end{cases}$ $\eta = 4(t_1/t - 0{,}5)^2$	$\dfrac{d_t \leqslant \min \begin{cases} 0{,}167\ \eta b_d + 0{,}667\ (1 - t_1/t)\ b_h \\ 0{,}167\ b_d \end{cases}}{d_t \leqslant \min \begin{cases} 0{,}286\ \eta b_d + 0{,}667\ (1 - t_1/t) b_h \\ 0{,}286\ b_d \end{cases}}$	$\sigma_y^u < 0$ $\lvert\sigma_y^u\rvert \geqslant 0{,}25\ \gamma_w H_d^u$	$\dfrac{d_t \leqslant 0{,}133\ \eta b_d}{d_t \leqslant 0{,}286\ \eta b_d}$
Контактное сечение	$d_t < 0{,}3\ \eta a_2$	$\dfrac{d_t \leqslant 0{,}083\ \eta b + 0{,}667\ (1 - t_1/t)\ a_2}{d_t \leqslant 0{,}2\ \eta b + 0{,}667\ (1 - t_1/t)\ a_2}$	$\sigma_c^u < 0$	$\dfrac{d_t \leqslant 0{,}3\ \eta a_2}{d_t \leqslant 0{,}2\ \eta b}$

Массивно-контрфорсные плотины

Горизонтальные сечения контрфорса (расчет в плоскости вдоль потока)	$\sigma_1^u \leqslant 0$	$\dfrac{d_t \leqslant \min \begin{cases} 1{,}333\ (t_1/t - 0{,}25)\ b_h \\ 0{,}167\ b_d \end{cases}}{d_t \leqslant \min \begin{cases} 1{,}333\ (t_1/t - 0{,}25)\ b_h \\ 0{,}286\ b_d \end{cases}}$	$\sigma_y^u < 0$ $\lvert\sigma_y^u\rvert \geqslant 0{,}25\ \gamma_w H_d^u$	$\dfrac{\sigma_1^u \leqslant 0}{\sigma_y^u \leqslant 0}$
Контактное сечение (расчет в плоскости вдоль потока)	$\sigma_c^u \leqslant 0$		$\sigma_c^u < 0$	$\dfrac{\sigma_c^u \leqslant 0}{\sigma_c^u \leqslant 0}$
Боковые грани контрфорсов (расчет в плоскости поперек потока); такие же условия для плотин с плоскими перекрытиями и многоарочных	$\sigma_y^u \leqslant 0$	$\dfrac{d_t \leqslant 1{,}333\ (t_1/t - 0{,}25)\ a_2}{d_t \leqslant 1{,}333\ (t_1/t - 0{,}25)\ a_2}$ $\dfrac{\sigma_y \leqslant 0}{d_t \leqslant 0{,}2t_1}$	$\sigma_y^u < 0$	$\dfrac{\sigma_y^u \leqslant 0}{d_t \leqslant 0{,}2\ t_1}$

Контрфорсные плотины с плоскими перекрытиями и многоарочные

Горизонтальные сечения контрфорсов	$\sigma_1^u \leqslant 0$	$\dfrac{\sigma_1^u \leqslant 0}{\sigma_y^u \leqslant 0}$	$\sigma_y^u < 0$ $\lvert\sigma_y^u\rvert \geqslant 0{,}25\ \gamma_w H_d^u$	$\sigma_y^u \leqslant 0$ $\dfrac{\lvert\sigma_y^u\rvert \geqslant 0{,}25\ \gamma_w H_d^u}{\sigma_1^u \leqslant 0}$
Контактное сечение контрфорсов	$\sigma_c^u \leqslant 0$	$\dfrac{\sigma_c^u \leqslant 0}{\sigma_c^u \leqslant 0}$	$\sigma_c^u < 0$	$\dfrac{\sigma_c^u \leqslant 0}{\sigma_c^u \leqslant 0}$

Примечание. d_t — глубина зоны растяжения в горизонтальных сечениях тела плотины и контактном сечении, определенная в предположении работы бетона у верховой грани на растяжение, м, и σ_y — суммарные нормальные напряжения по горизонтальным площадкам, определенные расчетами прочности контрфорса в плоскости вдоль потока и в плоскости поперек потока; остальные обозначения даны на рисунке 2.12. Числитель — без учета сейсма; знаменатель — с учетом сейсма.

наружного воздуха менее 17 °С. Особенности расчетов: не учитывают температурные воздействия; сейсмические воздействия определяют по линейно-спектральной теории для одномерной (консольной) схемы; силовое воздействие фильтрующейся воды учитывают в виде противодавления на контакте бетон — скала.

Условия прочности в эксплуатационный период при основном и особых сочетаниях нагрузок:

во всех точках плотин любого типа при расчетах на полный или сокращенный состав нагрузок

$$\gamma_n \gamma_{lc} |\sigma_3| \leqslant \gamma_{cd} R_b, \tag{2.16}$$

где γ_n, γ_{lc}, γ_{cd} — коэффициенты, принимаемые согласно п. 2.3; σ_3 — максимальные главные сжимающие напряжения, МПа; R_b — сопротивление бетона сжатию, МПа;

у верховой грани сооружений (табл. 2.14);

оголовков массивно-контрфорсных плотин при расчетах без учета сейсмических воздействий

$$\gamma_n \gamma_{lc} \sigma_z \leqslant 0{,}75 \gamma_{cd} R_{bt};$$

$$\gamma_n \gamma_{lc} |\sigma_z| \leqslant 0{,}75 \gamma_{cd} R_b; \tag{2.17}$$

оголовков массивно-контрфорсных плотин при расчетах с учетом сейсмических воздействий

$$\gamma_n \gamma_{lc} \sigma_z \leqslant \gamma_{cd} R_{bt};$$

$$\gamma_n \gamma_{lc} |\sigma_z| \leqslant \gamma_{cd} R_b, \tag{2.18}$$

где σ_z — нормальные напряжения по площадкам, перпендикулярным продольной оси потока, МПа; R_{bt} — сопротивление бетона растяжению, МПа.

Условия прочности в строительный период во всех точках тела плотин любых типов

$$\gamma_n \gamma_{lc} |\sigma_3| \leqslant \gamma_{cd} R_b;$$

$$\gamma_n \gamma_{lc} \sigma_1 \leqslant \gamma_{cd} R_{bt}, \tag{2.19}$$

где σ_3 и σ_1 — максимальные главные соответственно сжимающие и растягивающие напряжения, МПа.

Напряжения на верховой и низовой гранях (см. рис. 2.12) сооружений при расчете методами сопротивления материалов определяют по формулам:

на верховой грани

$$\sigma_y^u = -N/b_d + 6M/b_d^2;$$

$$\sigma_x^u = \sigma_y^u m^2{}_u - \gamma_w H_d^u (1 - m^2{}_u); \quad \tau^u{}_{xy} = (\gamma_w H_d^u + \sigma_y^u) m_u; \tag{2.20}$$

$$\sigma_1^u = \sigma_y^u (1 + m_u^2) + \gamma_w H_d^u m^2{}_u; \quad \sigma^u{}_3 = -\gamma_w H_d^u;$$

$$\sigma^u{}_c = 0{,}5 (1 + m^2{}_u) \left\{\sigma^u{}_y [\cos 2 (\alpha - \delta) + 1] + \gamma_w h \left[\cos 2 (\alpha - \delta) - \frac{1 - m^2{}_u}{1 + m^2{}_u}\right]\right\};$$

на низовой грани

$$\sigma_y^t = -N/b_d - 6M/b_d^2;$$

$$\sigma_x^t = \sigma_y^t m_t^2 - \gamma_w H_d^t (1 - m_t^2); \quad \tau^t{}_{xy} = -(\sigma_y^t + \gamma_w H_d^t) m_t; \tag{2.21}$$

$$\sigma_1^t = -\gamma_w H_d^t; \quad \sigma_3^t = \sigma_y^t (1 + m_t^2) + \gamma_w H_d^t m_t^2,$$

где σ_y^u, σ_x^u, σ_y^t, σ_x^t — нормальные напряжения по горизонтальным и вертикальным площадкам соответственно у верховой и низовой граней, МПа;

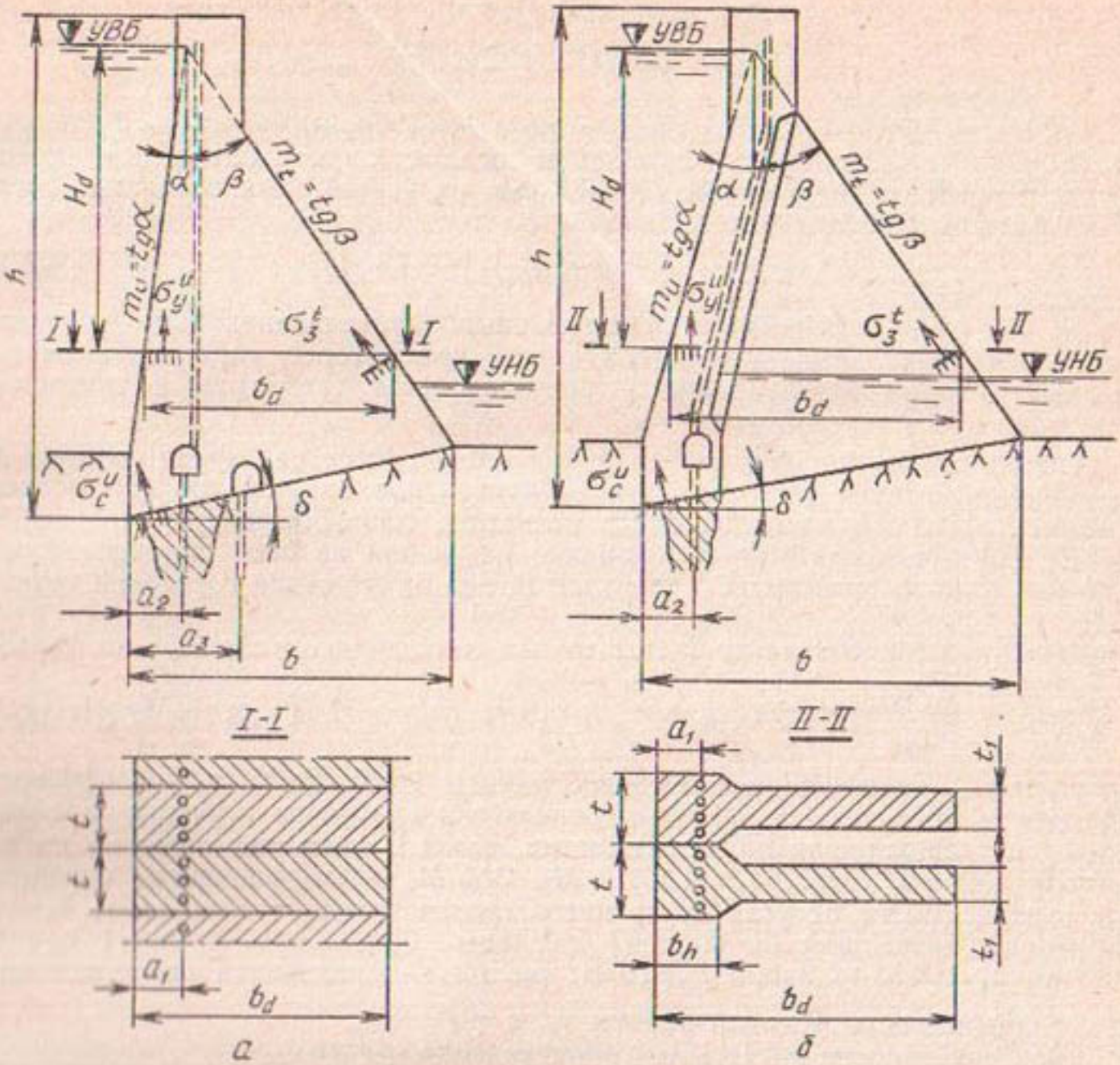


Рис. 2.12. Схема распределения напряжений на гранях плотины:

а — массивной; *б* — с расширенными швами; h — высота плотины; b — ширина плотины по основанию; t — длина секции; t_1 — толщина секции в пределах расширенных швов (толщина контрфорса); b_h — толщина торцевого сечения оголовка; a_1, a_2, a_3 — расстояние от верхней грани соответственно до дренажа тела плотины, оси цементационной завесы, дренажа основания; H_d — напор над расчетным сечением; b_d — ширина расчетного сечения; m_u, m_t — уклоны граней плотины соответственно верховой и низовой; σ_y^u σ_3^t σ_y^u — нормальные напряжения, действующие соответственно по горизонтальным площадкам у верховой грани, по площадкам, перпендикулярным низовой грани, по площадкам контактного сечения у верховой грани

τ_{xy}^u, τ_{xy}^t — касательные напряжения по тем же площадкам, МПа; σ_1^u, σ_3^u и σ_1^t, σ_3^t — максимальные растягивающие и максимальные сжимающие главные напряжения соответственно у верховой и низовой граней, МПа; σ_c^u — нормальные напряжения по площадкам контактного сечения у верховой грани, МПа; M — момент сил, приложенных к плотине выше расчетного сечения, относительно центра его тяжести, МН·м; N — нормальная сила, равная сумме проекций на нормаль к расчетному сечению всех сил, действующих на плотину выше расчетного сечения, МН; m_u, m_t — заложение верховой и низовой граней на уровне расчетного сечения; δ — угол между плоскостью подошвы и горизонтальной плоскостью. Остальные обозначения см. на рисунке 2.12.

Растягивающие силы (напряжения) приняты со знаком плюс, сжимающие — со знаком минус; моменты по часовой стрелке — со знаком плюс, против часовой стрелки — со знаком минус.

2.6. РАСЧЕТ ДЕФОРМАЦИЙ ОСНОВАНИЙ СООРУЖЕНИЙ

Расчет оснований, сложенных нескальными грунтами, по деформациям заключается в определении ожидаемых осадок s, горизонтальных смещений u и кренов i сооружений и отдельных их частей. Для основания сооружения должны выполняться условия

$$s \leqslant s_u; \qquad u \leqslant u_u; \qquad i \leqslant i_u, \tag{2.22}$$

где s_u, u_u, i_u — соответствующие предельные (устанавливаемые проектом) осадки, горизонтальные смещения и крены, при которых гарантируются нормальные условия эксплуатации и обеспечивается требуемая долговечность сооружения.

Методика расчета ожидаемых s, u и i базируется на теории линейно деформируемой среды. Поэтому среднее контактное напряжение (по подошве фундамента) не должно превышать расчетное сопротивление грунта основания R. Краевое контактное напряжение на любой из осей подошвы фундамента не должно превышать $1{,}2\,R$; контактное напряжение в угловой точке — $1{,}5\,R$.

Расчетное сопротивление (кПа) грунта основания определяют по формуле

$$R = \frac{\gamma_{c1}\gamma_{c2}}{\gamma_g}\left[M_\gamma k_z b \rho_{II} g + M_q d_1 \rho_{II}' g + (M_q - 1)\, d_b \rho_{II}' g + M_c c_{II}\right], \tag{2.23}$$

где γ_{c1} и γ_{c2} — коэффициенты условий работы (табл. 2.15); γ_g — коэффициент надежности по грунту, $\gamma_g = 1$, если показатели прочности грунта φ и c определены непосредственными испытаниями, $\gamma_g = 1{,}1$, если они приняты по табличным данным (табл. 1.8...1.10); M_γ, M_q, M_c — коэффициенты, определяемые в зависимости от угла внутреннего трения грунта (табл. 2.16); k_z — коэффициент, зависящий от ширины подошвы фундамента b, $k_z = 1$ при $b < 10$ м, $k_z = (8/b) + 0{,}2$ при $b \geqslant 10$ м; ρ_{II}, ρ'_{II} — осредненная расчетная плот-

2.15. Коэффициенты условий работы γ_{c1} и γ_{c2} для определения расчетного сопротивления грунта

Грунт	γ_{c1}	γ_{c2} для сооружений с жесткой конструктивной схемой при отношении длины сооружения или его отсека к его высоте l/H	
		4 и более	1,5 и менее
Крупнообломочные грунты с песчаным заполнителем и песчаные грунты, кроме мелких и пылеватых	1,4	1,2	1,4
Пески мелкие	1,3	1,1	1,3
Пески пылеватые:			
маловлажные и влажные	1,25	1,0	1,2
насыщенные водой	1,1	1,0	1,2
Пылевато-глинистые грунты, а также крупнообломочные с пылевато-глинистым заполнителем с показателем текучести грунта или заполнителя:			
$I_L < 0{,}25$	1,25	1,0	1,1
$0{,}25 < I_L \leqslant 0{,}5$	1,2	1,0	1,1
$I_L > 0{,}5$	1,1	1,0	1,0

Примечания. 1. К сооружениям с жесткой конструктивной схемой относят сооружения, конструкции которых специально приспособлены к восприятию усилий от деформаций оснований. 2. Для сооружений с гибкой конструктивной схемой принимают $\gamma_{c2} = 1$. 3. При промежуточных значениях l/H коэффициент γ_{c2} определяют интерполяцией.

2.16. Коэффициенты M_γ, M_q и M_c в зависимости от угла внутреннего трения для расчета сопротивления грунта

Угол внутреннего трения, φ°_{II}	Коэффициенты			Угол внутреннего трения, φ°_{II}	Коэффициенты		
	M_γ	M_q	M_c		M_γ	M_q	M_c
0	0	1,00	3,14	23	0,69	3,65	6,24
1	0,01	1,06	3,23	24	0,72	3,87	6,45
2	0,03	1,12	3,32	25	0,78	4,11	6,67
3	0,04	1,18	3,41	26	0,84	4,37	6,90
4	0,06	1,25	3,51	27	0,91	4,64	7,14
5	0,08	1,32	3,61	28	0,98	4,93	7,40
6	0,10	1,39	3,71	29	1,06	5,25	7,67
7	0,12	1,47	3,82	30	1,15	5,59	7,95
8	0,14	1,55	3,93	31	1,24	5,95	8,24
9	0,16	1,64	4,05	32	1,34	6,34	8,55
10	0,18	1,73	4,17	33	1,44	6,76	8,88
11	0,21	1,83	4,29	34	1,55	7,22	9,22
12	0,23	1,94	4,42	35	1,68	7,71	9,58
13	0,26	2,05	4,55	36	1,81	8,24	9,97
14	0,29	2,17	4,69	37	1,95	8,81	10,37
15	0,32	2,30	4,84	38	2,11	9,44	10,80
16	0,36	2,43	4,99	39	2,28	10,11	11,25
17	0,39	2,57	5,15	40	2,46	10,85	11,73
18	0,43	2,73	5,31	41	2,66	11,64	12,24
19	0,47	2,89	5,48	42	2,88	12,51	12,79
20	0,51	3,06	5,66	43	3,12	13,46	13,37
21	0,56	3,24	5,84	44	3,38	14,50	13,98
22	0,61	3,44	6,04	45	3,66	15,64	14,64

ность грунтов, соответственно залегающих ниже подошвы фундамента до глубины, равной $0{,}25\,b$, и выше подошвы фундамента, т/м³; g — ускорение свободного падения, $g=10$ м/с²; d_1 — глубина заложения фундаментов бесподвальных сооружений или приведенная глубина заложения фундаментов в подвале сооружений, например заглубленных НС, м; d_b — глубина подвала, то есть расстояние от уровня планировки поверхности земли до пола подвала, м, ($d_b=2$ м для сооружений с шириной подвала не более 20 м и глубиной более 2 м, $d_b=0$ при ширине подвала более 20 м); c_{II} — расчетное удельное сцепление грунта, залегающего непосредственно под подошвой фундамента, кПа.

Расчетную плотность слоя грунта, находящегося ниже уровня грунтовых вод, но выше водоупора, определяют с учетом взвешивающего действия воды по формуле (2.25).

Приведенную глубину заложения фундаментов в подвале определяют по формуле

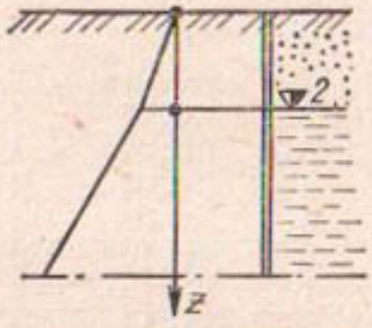
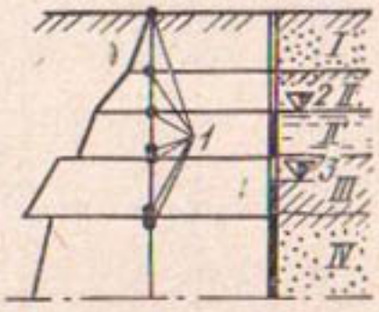
$$d_1 = h_s + h_{cf}\,(\rho_{cf}/\rho_{II}'), \qquad (2.24)$$

где h_s — толщина слоя грунта выше подошвы фундамента в подвале, м; h_{cf} — толщина конструкции пола в подвале, м; ρ_{cf} — осредненная расчетная плотность материала конструкции пола, т/м³.

Большинство сетевых сооружений (регуляторы трубчатые, совмещенные с переездами, переезды трубчатые, регуляторы открытые и т. п.) передает небольшую нагрузку на грунт основания (не более 0,5—0,6 МПа). При расчете их оснований по деформациям контактные напряжения с расчетным сопротивлением грунта основания не сравнивают.

Расчет оснований, сложенных скальными грунтами, состоит из расчетов местной прочности и перемещений только бетонных и железобетонных сооружений I класса.

2.17. Расчетные формулы для определения природных напряжений в грунтовом массиве σ_{zg}, МПа

Вид основания	Расчетная формула	Эпюра природного напряжения
Однородное по глубине, ограниченное горизонтальной плоскостью	$\sigma_{zg}=\rho z$	
Неоднородное, состоящее из слоев толщиной h_i с равномерной плотностью грунта ρ_i в пределах каждого слоя	$\sigma_{zgl}=\sigma zg(i-1)+\rho_i h_i$	

Примечание. *1* — характерные точки эпюры; *2* — УГВ; *3* — УНВ; I и II — неводонасыщенный грунт; II — водонасыщенный грунт; III — водонепроницаемый грунт; IV — водонасыщенный грунт с напорными грунтовыми водами.

Расчет напряжений в основании сооружений. Для расчета любых оснований необходимо знать напряженное состояние грунтов как до строительства сооружения, так и после него. *Напряжения* σ_{zg}, существующие в грунтовом массиве до строительства сооружения и возникающие от действия его собственного веса, называют *природными* (табл. 2.17). Вес почти всех сооружений больше веса грунта, находящегося в объеме их подземной части до строительства, поэтому после него в грунтах оснований возникают напряжения, дополнительные к природным. Нормальные вертикальные дополнительные напряжения σ_{zp} называют *сжимающими напряжениями,* а формирующиеся в грунтах оснований после строительства сооружения — *суммарными.*

Для сооружения, длина подошвы фундамента которого (или его отдельных частей) превышает ее ширину более чем в 3 раза, напряжения определяют решением плоской задачи, при меньшей длине — пространственной.

Для грунта ниже УГВ, но выше водонепроницаемого слоя вместо ρ вводят эффективную плотность ρ_{ef}, учитывающую взвешивающее действие воды,

$$\rho_{ef}=(\rho_s-\rho_w)/(1+e), \qquad (2.25)$$

где ρ_s и ρ_w — плотность частиц грунта и воды соответственно, т/м³; e — коэффициент пористости грунта.

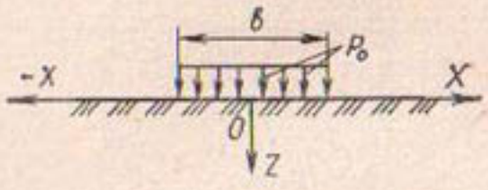
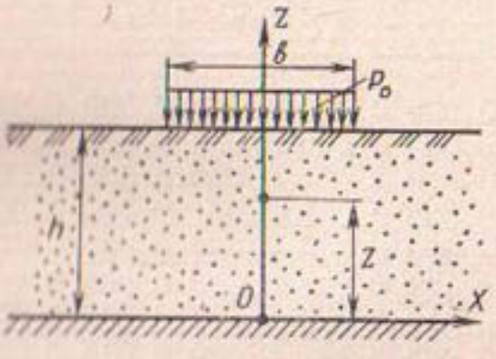
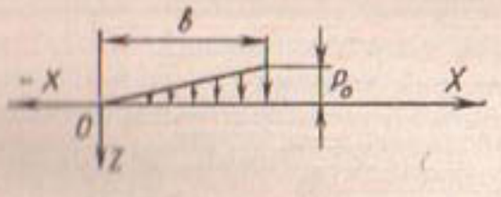
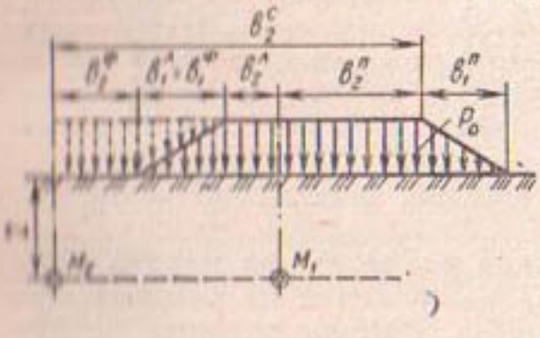
При действии фильтрационных сил вертикально вверх

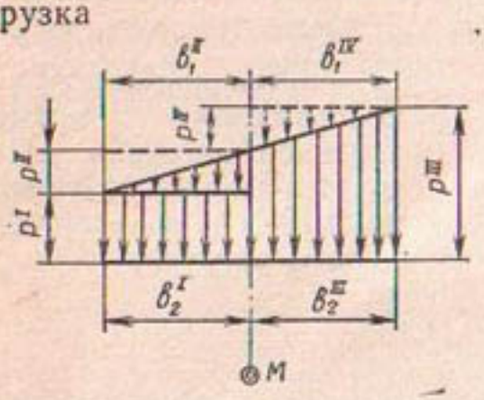
$$\rho_{ef}=(\rho_s-\rho_w)/(1+e)-\rho_w I, \qquad (2.26)$$

где I — среднее значение вертикальной составляющей градиента напора в рассматриваемом слое.

Сжимающее напряжение в любой точке основания зависит от дополнительной внешней нагрузки и вида ее эпюры. Если ширина (диаметр) подошвы фундамента $b\geqslant 10$ м, то интенсивность дополнительной нагрузки $p_0=p$, при $b<10$ м $p_0=p-\sigma_{zg0}$, где p — интенсивность суммарной нагрузки, передаваемой подошвой фундамента на грунт основания, то есть значение контактного

2.18. Расчетные формулы для определения сжимающих напряжений (плоская задача)

Вид и схема нагрузки	Расчетная формула	Величины, входящие в формулу
Полосовая прямоугольная нагрузка 	$\sigma_{zp}=\alpha_z p_0$	p_0 — интенсивность дополнительной прямоугольной нагрузки, кПа; α_z определяют по таблице 2.19, где b — ширина полосы загрузки
Полосовая прямоугольная нагрузка на слой конечной толщины 	$\sigma_{zp}=\alpha_z p_0$	p_0 — интенсивность дополнительной прямоугольной нагрузки, действующей на слой конечной толщины h, кПа; α_z определяют по таблице 2.20
Полосовая треугольная нагрузка 	$\sigma_{zp}=\alpha_z p_0$	p_0 — максимальная интенсивность дополнительной треугольной нагрузки, кПа; α_z определяют по таблице 2.21
Полосовая трапецеидальная нагрузка (плотины, дамбы и др.) 	$\sigma_{zp}=\sum_{i=1}^{n} k_i p_0$ В точке M_1 $\sigma_{zp}=k^n p_0+k^n p_0$ В точке M_2 $\sigma_{zp}=k^c p_0-k^\Phi p_0$	p_0 — интенсивность дополнительной нагрузки, кПа; k_i определяют по номограмме (см. рис. 2.13) в зависимости от отношений b_1/z и b_2/z, b_1 и b_2 — ширина полосы с треугольной и прямоугольной нагрузкой соответственно; k^n определяют по номограмме рисунка 2.13 для b_1^n/z и b_2^n/z, а k^n для b_1^n/z и b_2^n/z. k^c определяют для b_1^n/z и b_2^c/z, а k^Φ — для b_1^Φ/z и b_2^Φ/z — по номограмме рисунка 2.13

Вид и схема нагрузки	Расчетная формула	Величины, входящие в формулу
Полосовая трапецеидальная нагрузка 	$\sigma_{zp}=\sum_{i=1}^{n} k_i p_0^i$ В точке М $\sigma_{zp}=k_{\text{I}}p_0^{\text{I}}+k_{\text{II}}p_0^{\text{II}}+k_{\text{III}}p_0^{\text{III}}-k_{\text{IV}}p_0^{\text{IV}}$	p_0^i — интенсивность нагрузки на участке b^i; k_i определяют по номограмме рисунка 2.13 для b_1^i/z и b_2^i/z По номограмме рисунка 2.13 определяют k_{I} для $(0, b_2^{\text{I}}/z)$; k_{II} для $(b_1^{\text{II}}/z, 0)$; k_{III} для $(0, b_2^{\text{III}}/z)$; k_{IV} для $(b_1^{\text{IV}}/z, 0)$

2.19. Коэффициент α_z для решения плоской задачи с прямоугольной эпюрой нагрузки

$2z/b$	$2x/b$											
	0	0,1	0,2	0,3	0,5	0,7	1	1,5	2	3	4	5
0,0	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
0,1	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	0,500	0,002	0,000	0,000	0,000	0,000
0,2	0,998	0,996	0,996	0,996	0,989	0,961	0,499	0,010	0,005	0,000	0,000	0,000
0,3	0,993	0,993	0,987	0,985	0,966	0,910	0,498	0,030	0,005	0,001	0,000	0,000
0,5	0,960	0,960	0,954	0,942	0,907	0,808	0,496	0,090	0,019	0,002	0,001	0,000
0,7	0,906	0,905	0,900	0,887	0,830	0,732	0,489	0,148	0,042	0,005	0,004	0,001
1,0	0,822	0,820	0,815	0,807	0,728	0,651	0,479	0,218	0,084	0,017	0,005	0,008
1,5	0,670	0,666	0,661	0,647	0,607	0,552	0,449	0,262	0,145	0,050	0,015	0,007
2,0	0,550	0,543	0,540	0,535	0,511	0,475	0,409	0,288	0,185	0,071	0,029	0,013
3,0	0,397	0,395	0,395	0,389	0,379	0,354	0,334	0,273	0,211	0,114	0,059	0,032
4,0	0,306	0,305	0,304	0,303	0,292	0,291	0,275	0,243	0,205	0,134	0,083	0,051
5,0	0,242	0,242	0,242	0,241	0,239	0,237	0,231	0,215	0,188	0,140	0,094	0,065

2.20. Коэффициент α_z для решения плоской задачи с прямоугольной эпюрой нагрузки, действующей на слой конечной толщины

z/h	При толщине сжимаемого слоя грунта		
	$h=0,5b$	$h=b$	$h=2,5b$
1,0	1,000	1,00	1,00
0,8	1,009	0,99	0,82
0,6	1,020	0,92	0,57
0,4	1,024	0,84	0,44
0,2	1,023	0,78	0,37
0,0	1,022	0,76	0,36

(подошва фундамента — грунт основания) напряжения, σ_{zg0} — природное напряжение на уровне подошвы фундамента.

Любую эпюру дополнительной нагрузки можно разделить на прямоугольную и треугольную части, методика определения напряжений от которых достаточно подробно разработана в механике грунтов. Любую подошву сооружения (фундамента) можно разделить на ряд участков прямоугольной формы. Используя принцип независимого действия сил, путем сложения напряжений от прямоугольной и треугольной эпюр нагрузки определяют действующей на каждом прямоугольном участке подошвы, сжимающие напряжения в

2.21. Коэффициент α_z для решения плоской задачи с треугольной эпюрой нагрузки

z/b	x/b										
	−1,5	−1	−0,5	0	0,25	0,5	0,75	1	1,5	2	2,5
0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,250	0,500	0,750	0,500	0,000	0,000	0,000
0,25	0,000	0,000	0,001	0,075	0,256	0,480	0,643	0,424	0,015	0,003	0,000
0,50	0,002	0,003	0,023	0,127	0,263	0,410	0,477	0,353	0,056	0,017	0,003
0,75	0,006	0,016	0,042	0,153	0,248	0,335	0,361	0,293	0,108	0,024	0,009
1,00	0,014	0,025	0,061	0,159	0,223	0,275	0,279	0,241	0,129	0,045	0,013
1,50	0,020	0,048	0,096	0,145	0,178	0,200	0,202	0,185	0,124	0,062	0,041
2,00	0,033	0,061	0,092	0,127	0,146	0,155	0,163	0,153	0,108	0,069	0,050
3,00	0,050	0,064	0,080	0,096	0,103	0,104	0,108	0,104	0,090	0,071	0,050
4,00	0,051	0,060	0,067	0,075	0,078	0,085	0,082	0,075	0,073	0,600	0,049
5,00	0,047	0,052	0,057	0,059	0,062	0,063	0,063	0,065	0,061	0,051	0,047
6,00	0,041	0,041	0,050	0,051	0,052	0,053	0,053	0,053	0,050	0,050	0,045

любой точке грунтов основания от дополнительной нагрузки, передаваемой подошвой фундамента любой формы, с эпюрой практически любого вида. При этом чем меньше размеры прямоугольных участков подошвы фундамента и прямоугольных и треугольных частей эпюры, тем точнее будет определено напряжение.

Формулы для определения сжимающих напряжений от прямоугольных и треугольных нагрузок для случая плоской задачи приведены в таблице 2.18, а для пространственной — в таблице 2.22. Коэффициент α_z, входящий в формулы, зависит от формы и размеров подошвы сооружения (фундамента), а также от относительного местоположения расчетной точки. Значения его для соответствующих случаев приведены в таблицах 2.19, 2.20, 2.21, 2.23, 2.24. Расчетные схемы даны на рисунках таблиц 2.18 и 2.22.

Значения аналогичного коэффициента k_t для полосовой нагрузки с более сложной эпюрой определяют по номограмме рисунка 2.13 в зависимости от отношения ширины полосы загружения треугольной (b_1/z) и прямоугольной (b_2/z) нагрузки, kz — глубина расположения рассматриваемой точки.

Определение ожидаемых осадок оснований гидросооружений. Ожидаемые конечные осадки гидротехнических сооружений s, как правило, определяют *методом послойного суммирования*. Суть метода заключается в том, что сжимаемую толщу H_c в основании сооружений с активным проявлением осадок разбивают на элементарные слои (рис. 2.14) и определяют вертикальную деформацию (сжатия) каждого слоя. Сумма деформаций всех элементарных слоев дает осадку сооружения. Толщина элементарного слоя не должна превышать $0{,}4\,b$ (b — ширина подошвы фундамента), а каждый элементарный слой должен находиться в пределах только одного геологического слоя.

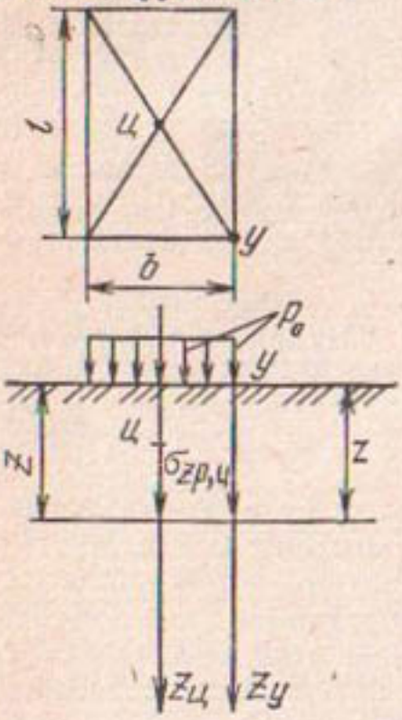
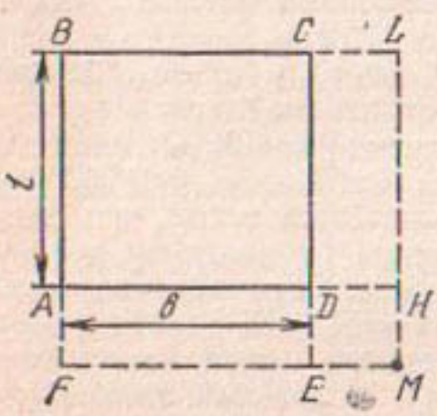
Верхней границей сжимаемой толщи H во всех случаях является подошва фундамента. Нижнюю границу сжимаемой толщи как линейно деформируемого полупространства находят из условия $\sigma_{zp}=0{,}5\,\sigma_{zg}$ при $b\geqslant 10$ м; $\sigma_{zp}=0{,}2\,\sigma_{zg}$ при $b<10$ м. В последнем случае при попадании нижней границы в сильносжимаемый слой грунта с модулем деформации $E<5$ МПа ее находят заново из условия $\sigma_{zp}=0{,}1\,\sigma_{zg}$. При $b\geqslant 10$ м значение σ_{zg} на отметке подошвы фундамента (дна котлована) принимают равным нулю.

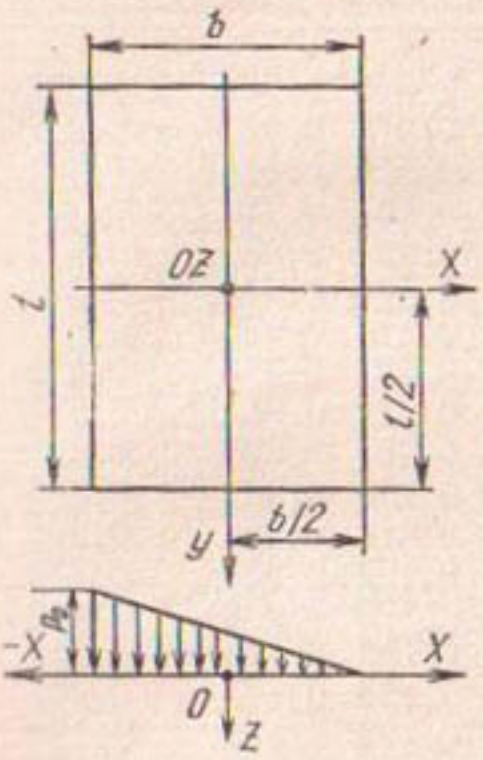
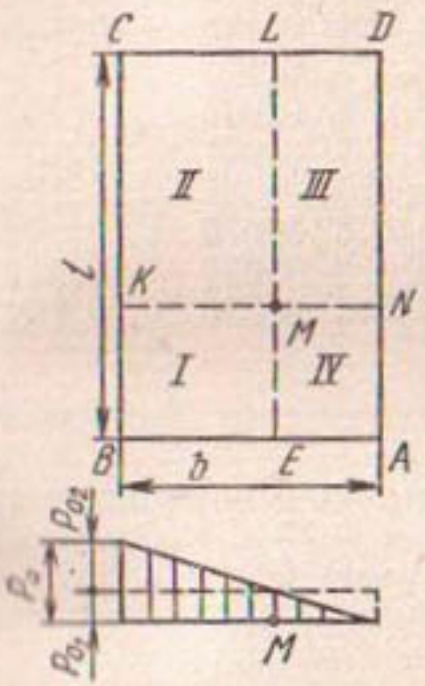
Основание рассматривают как линейно деформируемый слой с расчетной толщиной H, если в пределах сжимаемой толщи H_c грунтов основания как линейно деформируемого полупространства залегает слой малосжимаемого грунта с модулем деформации $E_1\geqslant 100$ МПа и толщиной h, удовлетворяющей условию

$$h\geqslant H_c\left(1-\sqrt[3]{E_2/E_1}\right), \qquad (2.27)$$

где E_2 — модуль деформации грунта, подстилающего слой с модулем E_1 ($E_2<E_1$).

2.22. Расчетные формулы для определения сжимающих напряжений (пространственная задача)

Вид и схема нагрузки	Расчетная формула	Величины, входящие в формулу
Прямоугольная нагрузка на прямоугольной или круглой подошве, фундамента 	Для точек на центральной вертикали Ц $\sigma_{zp,ц} = \alpha_z p_0$	p_0 — интенсивность дополнительной нагрузки, кПа; α_z определяют по таблице 2.23 для ($\xi = z/r$; r) при круглой и для ($\xi = 2z/b$; $n = l/b$) при прямоугольной подошве; z — глубина расположения точки от уровня подошвы, м; r — радиус круглой подошвы, м; l и b — длина и ширина прямоугольной подошвы, м
	Для точек на угловой вертикали У $\sigma_{zp,y} = (\alpha_z/4) p_0$	p_0; z; l; b — то же; α_z определяют по таблице 2.23 для ($\xi = z/b$; $n = l/b$)
	Для точек на любой вертикали внутри и вне фундамента $\sigma_{zp} = \sum_1^n \pm \sigma_{zp,y} =$ $= \sum_1^n \pm (\alpha_z/4) p_0$	p_0; z; l; b; ξ — то же; n — число расчетных прямоугольников
	Для точек на вертикали М $\sigma_{zp,м} = \sigma_{zp,y}^{MFBL} - \sigma_{zp,y}^{MFAH} - \sigma_{zp,y}^{MECL} + \sigma_{zp,y}^{MEDH}$	
Треугольная нагрузка на прямоугольной подошве фундамента	Для точек на вертикали, проходящей через угол $x = b/2$, $y = l/2$, $\sigma_{zp,y} = \alpha_z p_0$	p_0 — максимальная интенсивность дополнительной нагрузки, кПа; α_z определяют по таблице 2.24 для ($l/2b$, z/b); l и b — длина и ширина подошвы, м; z — глубина расположения точки от уровня подошвы, м

Вид и схема нагрузки	Расчетная формула	Величины, входящие в формулу
	Для точек на вертикали, проходящей через угол $x=-b/2$, $y=l/2$, $\sigma_{zp,y}=\sigma^{п}_{zp,y}-\sigma^{т}_{zp,y}$	$\sigma^{п}_{zp,y}$ — сжимающее напряжение от прямоугольной нагрузки интенсивностью p_0 (кПа) на угловой вертикали, кПа; $\sigma^{т}_{zp,y}$ — то же от треугольной нагрузки интенсивностью p_0 (кПа) на угловой вертикали $x=b/2$, $y=l/2$
	Для точек на любой вертикали M внутри подошвы $\sigma_{zp,м}=\sum_{1}^{n}\pm\sigma^{п,т}_{zp,y}=$ $=\sigma^{МКВЕ,п}_{zp,y}+$ $+\sigma^{МКВЕ,т}_{zp,y}+$ $+\sigma^{MLCK,п}_{zp,y}+$ $+\sigma^{MLCK,т}_{zp,y}+$ $+\sigma^{MEAN,п}_{zp,y}-$ $-\sigma^{MEAN,т}_{zp,y}+$ $+\sigma^{MNDL,п}_{zp,y}-$ $-\sigma^{MNDL,т}_{zp,y}$	n — число расчетных прямоугольников; $\sigma^{п,т}_{zp,y}$ — сжимающие напряжения от прямоугольной и треугольной нагрузок интенсивностью p_0 (кПа) на угловой вертикали M расчетных прямоугольников подошвы, кПа; $\sigma^{МКВЕ,п}_{zp,y}$, $\sigma^{MLCK,п}_{zp,y}$, $\sigma^{MEAN,п}_{zp,y}$, $\sigma^{MNDL,п}_{zp,y}$ — от прямоугольной нагрузки интенсивностью p_{01} (кПа) на угловой вертикали соответственно прямоугольников МКВЕ, MLCK, MEAN, MNDL, кПа; $\sigma^{МКВЕ,т}_{zp,y}$, $\sigma^{MLCK,}_{zp,y}$ то же, от треугольной нагрузки интенсивностью p_{02} (кПа); $\sigma^{MEAN,т}_{zp,y}$, $\sigma^{MNDL,т}_{zp,y}$ — то же от треугольной нагрузки интенсивностью p_{01} (кПа).

2.23. Коэффициент α_z для решения пространственной задачи с прямоугольной эпюрой нагрузки для разной формы фундаментов

$\frac{z}{b}$	Круглых радиусом r	Прямоугольных при соотношении сторон $n=l/b$						Ленточных при $n>10$
		1	1,4	1,8	2,4	3,2	5	
0,0	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
0,4	0,949	0,960	0,972	0,975	0,976	0,977	0,977	0,977
0,8	0,756	0,800	0,848	0,866	0,875	0,879	0,881	0,881
1,2	0,547	0,606	0,682	0,717	0,740	0,749	0,754	0,755
1,6	0,390	0,449	0,532	0,578	0,612	0,630	0,639	0,642
2,0	0,285	0,336	0,414	0,463	0,505	0,529	0,545	0,550
2,4	0,214	0,257	0,325	0,374	0,419	0,449	0,470	0,477
2,8	0,165	0,201	0,260	0,304	0,350	0,383	0,410	0,420
3,2	0,130	0,160	0,210	0,251	0,294	0,329	0,360	0,374
3,6	0,106	0,130	0,173	0,209	0,250	0,285	0,320	0,337
4,0	0,087	0,108	0,145	0,176	0,214	0,248	0,285	0,306
4,4	0,073	0,091	0,122	0,150	0,185	0,218	0,256	0,280
4,8	0,067	0,077	0,105	0,130	0,161	0,192	0,230	0,258
5,2	0,053	0,066	0,091	0,112	0,141	0,170	0,208	0,239
5,6	0,046	0,058	0,079	0,099	0,124	0,152	0,189	0,223
6,0	0,040	0,051	0,070	0,087	0,110	0,136	0,172	0,208
6,4	0,036	0,045	0,062	0,077	0,098	0,122	0,158	0,196
6,8	0,032	0,040	0,055	0,069	0,088	0,110	0,144	0,184
7,2	0,028	0,036	0,049	0,062	0,080	0,100	0,133	0,175
7,6	0,024	0,032	0,044	0,056	0,072	0,091	0,123	0,166
8,0	0,022	0,029	0,040	0,051	0,066	0,084	0,113	0,158
8,4	0,021	0,026	0,037	0,046	0,060	0,077	0,105	0,150
8,8	0,019	0,024	0,034	0,042	0,055	0,070	0,098	0,144
9,2	0,018	0,022	0,031	0,039	0,051	0,065	0,091	0,137
9,6	0,016	0,020	0,028	0,036	0,047	0,060	0,085	0,132
10	0,015	0,019	0,026	0,033	0,044	0,056	0,079	0,126
11	0,011	0,017	0,023	0,029	0,040	0,050	0,071	0,114
12	0,009	0,015	0,020	0,026	0,034	0,044	0,060	0,104

При этом расчетную толщину линейно деформируемого слоя H принимают до кровли грунта с модулем деформации $E_1 \geqslant 100$ МПа.

При ширине (диаметре) подошвы фундамента $b \geqslant 10$ м основание рассматривают как линейно деформируемый слой и в том случае, когда модуль деформации грунтов основания $E \leqslant 100$ МПа, но не менее 10 МПа. Если основание сложено только пылевато-глинистыми или только песчаными грунтами, расчетную толщину слоя определяют по формуле

$$H = (H_0 - \psi b) K_p, \qquad (2.28)$$

где H_0 и ψ — принимают соответственно равными для оснований, сложенных только пылевато-глинистыми грунтами, 9 м и 0,15, а для оснований, сложенных только песчаными грунтами, — 6 м и 0,1; K_p — коэффициент при средней интенсивности нагрузки, передаваемой подошвой фундамента на грунт основания, $p=0{,}1$ МПа, $K_p=0{,}8$, при $p=0{,}5$ МПа $K_p=1{,}2$, при промежуточных значениях p K_p определяют интерполяцией.

Если основание сложено одновременно пылевато-глинистыми и песчаными грунтами, H определяют по формуле

$$H = H_s + (h_{cl}/3), \qquad (2.29)$$

где H_s — расчетная толщина слоя, которую вычисляют по формуле (2.28), предположив, что основание сложено только песчаными грунтами; h_{cl} — суммарная толщина слоев пылевато-глинистых грунтов в пределах расчетной

2.24. **Коэффициент α_z для решения пространственной задачи с треугольной эпюрой нагрузки в зависимости от размеров фундамента $l \times b$ и положения точки z**

z/b	$l/2b$						
	0,2	0,4	0,6	0,8	1	1,2	1,4
0	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
0,2	0,0223	0,0280	0,0296	0,0301	0,0304	0,0305	0,0305
0,4	0,0269	0,0420	0,0487	0,0517	0,0531	0,0539	0,0543
0,6	0,0259	0,0448	0,0560	0,0621	0,0654	0,0673	0,0684
0,8	0,0232	0,0421	0,0553	0,0637	0,0688	0,0720	0,0739
1,0	0,0201	0,0375	0,0508	0,0602	0,0666	0,0708	0,0735
1,2	0,0171	0,0324	0,0450	0,0546	0,0615	0,0664	0,0698
1,4	0,0145	0,0278	0,0392	0,0483	0,0551	0,0606	0,0644
1,6	0,0123	0,0238	0,0339	0,0424	0,0492	0,0545	0,0586
1,8	0,0105	0,0204	0,0294	0,0371	0,0435	0,0487	0,0528
2,0	0,0090	0,0176	0,0255	0,0324	0,0384	0,0434	0,0474
2,5	0,0063	0,0125	0,0183	0,0236	0,0284	0,0326	0,0362
3,0	0,0046	0,0092	0,0135	0,0176	0,0214	0,0249	0,0289
5,0	0,0018	0,0036	0,0054	0,0071	0,0088	0,0104	0,0120
7,0	0,0009	0,0019	0,0028	0,0038	0,0017	0,0056	0,0064
10,0	0,0005	0,0009	0,0014	0,0019	0,0023	0,0028	0,0033

Продолжение

z/b	$l/2b$							
	1,6	1,8	2	3	4	6	8	10
0	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
0,2	0,0306	0,0306	0,0306	0,0306	0,0306	0,0306	0,0306	0,0306
0,4	0,0545	0,0546	0,0547	0,0548	0,0549	0,0549	0,0549	0,0549
0,6	0,0690	0,0694	0,0696	0,0701	0,0702	0,0702	0,0702	0,0702
0,8	0,0751	0,0759	0,0764	0,0773	0,0776	0,0776	0,0776	0,0776
1,0	0,0753	0,0766	0,0774	0,0790	0,0794	0,0795	0,0796	0,0796
1,2	0,0721	0,0738	0,0749	0,0774	0,0779	0,0782	0,0783	0,0783
1,4	0,0672	0,0692	0,0707	0,0739	0,0748	0,0752	0,0752	0,0753
1,6	0,0616	0,0639	0,0656	0,0697	0,0708	0,0714	0,0715	0,0715
1,8	0,0560	0,0585	0,0604	0,0652	0,0666	0,0673	0,0675	0,0675
2,0	0,0507	0,0533	0,0553	0,0607	0,0624	0,0634	0,0636	0,0636
2,5	0,0393	0,0419	0,0440	0,0504	0,0529	0,0543	0,0547	0,0548
3,0	0,0307	0,0331	0,0352	0,0419	0,0449	0,0469	0,0474	0,0476
5,0	0,0135	0,0148	0,0161	0,0214	0,0248	0,0283	0,0296	0,0301
7,0	0,0073	0,0081	0,0089	0,0124	0,0152	0,0186	0,0204	0,0212
10,0	0,0037	0,0041	0,0046	0,0066	0,0084	0,0111	0,0128	0,0139

толщины слоя H, которую определяют по формуле (2.28), предположив, что основание сложено только пылевато-глинистыми грунтами.

Если нижняя граница линейно деформируемого слоя с расчетной толщиной H попадает на слой грунта с модулем деформации $E<10$ МПа, толщина которого не превышает $0{,}2\,H$, то значение H, вычисленное по формулам (2.28) и (2.29), нужно увеличить на толщину этого слоя, а если толщина этого слоя больше, то основание рассматривают как линейно деформируемое полупространство.

Конечную осадку s (см) любых сооружений с шириной подошвы фундамента не менее 10 м определяют по формуле

$$s = \beta E_m / E_{red} \sum_{i=1}^{n} \sigma_{zpi} h_i / E_i, \qquad (2.30)$$

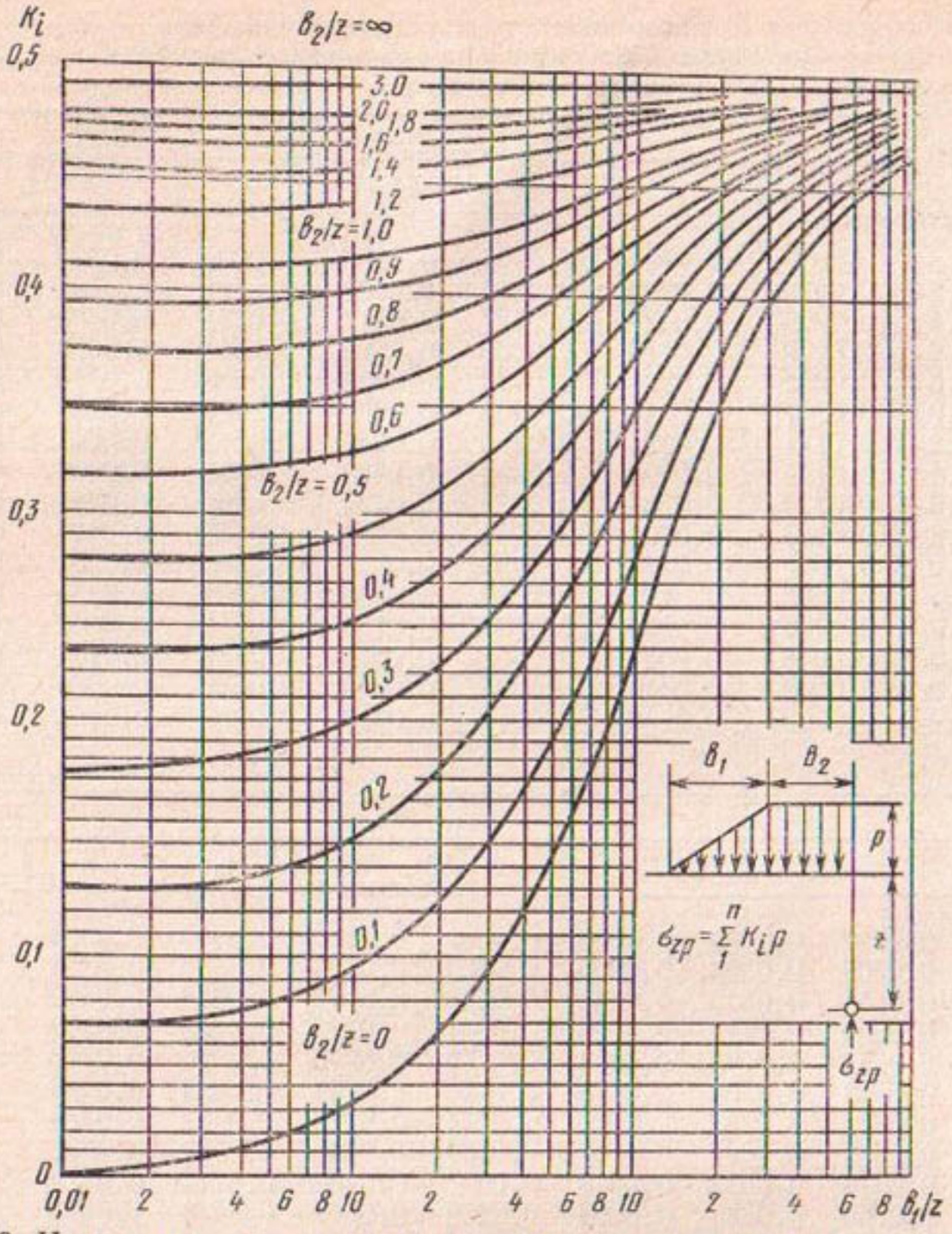
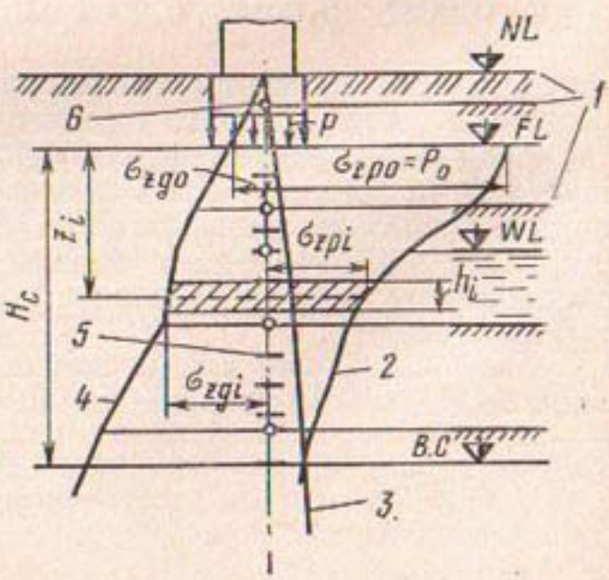


Рис. 2.13. Номограмма для определения сжимающих напряжений σ_{zp} в грунтовом основании от полосовой нагрузки со сложной эпюрой (полупространственная задача):

b_1, b_2 — ширина участков приложения треугольной и полосовой нагрузок интенсивностью p; z — ордината расчетной точки

Рис. 2.14. Схема к определению конечных осадок сооружений:



1 — границы геологических слоев; *2* — эпюра сжимающих напряжений σ_{zp}; *3* — вспомогательная эпюра природных напряжений ($0{,}5\sigma_{zg}$; $0{,}2\sigma_{zg}$ или $0{,}1\sigma_{zg}$); *4* — эпюра природных напряжений σ_{zg}; *5* — границы элементарных слоев; *6* — характерные точки; *NL*, *FL*, *WL* — отметки соответственно поверхности грунта, подошвы фундамента, уровня грунтовых вод; *BC* — нижняя граница сжимаемой толщи; P — интенсивность суммарной нагрузки от сооружения; z_i и h_i — соответственно глубина от подошвы и толщина i-го элементарного слоя; H_c — мощность сжимаемой толщи; σ_{zgo} и σ_{zgi} — природное напряжение; σ_{zpo} и σ_{zpi} — сжимающее напряжение соответственно на уровне подошвы фундамента и середины элементарного слоя

где β — безразмерный коэффициент, зависящий от грунтов основания, $\beta=0{,}8$ для однородного или неоднородного основания, сложенного несвязными грунтами или связными (глинистыми) с коэффициентом консолидации $c_v \geqslant 4$, $\beta=1{,}08$ для оснований, сложенных связными грунтами с $c_v<4$ и показателем текучести $0 \leqslant I_L \leqslant 0{,}5$ (при $I_L>0{,}5$ конечную осадку основания определяют экспериментально); E_m и E_{red} — соответственно средний и приведенный модули деформации, кПа; n — число элементарных слоев в пределах сжимаемой толщи; σ_{zpi} — сжимающее напряжение в середине i-го элементарного слоя, кПа; h_i — толщина i-го слоя, см; E_i — модуль деформации грунтов i-го слоя, кПа.

Конечную осадку любых сооружений с шириной подошвы фундамента менее 10 м находят по формуле (2.30) при $E_m/E_{red}=1$.

Коэффициент степени консолидации находят по формуле

$$c_v = 100k\,(1+e)\,t\sigma_{zp}/[(e-e_p)\,\rho_w h^2], \qquad (2.31)$$

где k — коэффициент фильтрации грунтов, м/сут; e — коэффициент пористости грунта в природном состоянии; t — время возведения сооружения, сут; σ_{zp} — сжимающее напряжение в середине слоя связного грунта, МПа; e_p — ожидаемый коэффициент пористости грунта после строительства сооружения; ρ_w — плотность воды, $\rho_w=1$ т/м^3; h — толщина слоя грунта, м.

Средний модуль деформации грунтов E_m вычисляют по формуле

$$E_m = \sum_{i=1}^{n} (E_i \alpha_{zi} h_i) \Bigg/ \sum_{i=1}^{n} (\alpha_{zi} h_i), \qquad (2.32)$$

где α_{zi} — коэффициент, принимаемый по таблице 2.19; n, E_i, h_i — то же, что и в формуле (2.30).

Приведенный модуль деформации грунтов E_{red} определяют по формулам

$$E_{red} = E_m \sigma/[\sigma - \sigma_{zg0} + (E_m/E_{g,m})\,\sigma_{zg0}]; \qquad (2.33)$$

$$E_{g,m} = \sum_{i=1}^{n} (E_{gi} \alpha_{zi} h_i) \Bigg/ \sum_{i=1}^{n} (\alpha_{zi} h_i); \qquad (2.34)$$

$$E_{g,i} = E_i\,(e_{1i} - e_{2i})/(e'_{1i} - e'_{2i}), \qquad (2.35)$$

где σ — среднее контактное напряжение по подошве сооружения (фундамента), $\sigma=p$, МПа; σ_{zg0} — природное напряжение на уровне дна котлована до его устройства, МПа; $E_{g,m}$ и $E_{g,i}$ — модуль деформации грунта при природном напряжении соответственно средний и i-го слоя; e_{1i} — коэффициент пористости грунта i-го элементарного слоя при природном напряжении σ_{zgi} в его середине, принимаемый по компрессионной кривой первичного сжатия; e_{2i} — то же при суммарном напряжении $(\sigma_{zpi}+\sigma_{zgi})$; e'_{1i}, e'_{2i} — то же принимаемые по компрессионной кривой вторичного сжатия. Остальные обозначения те же, что и в формулах (2.30) и (2.32).

Модуль деформации грунтов i-го элементарного слоя находят по формуле

$$E_i = \overline{E}_i m_b m_g, \qquad (2.36)$$

где E_i — модуль линейной деформации грунтов i-го слоя по данным компрессионных испытаний (см. табл. 1.6); m_b — поправочный коэффициент на размеры подошвы фундамента, $m_b=1$ при $b<20$ м или площади подошвы $A<500$ м^2, $m_b=1{,}5$ при $b \geqslant 20$ м или $A>500$ м^2; m_g — поправочный коэффициент на грунт основания, $m_g=1$ для песчаных и пластичных глинистых грунтов, для твердых и полутвердых глинистых грунтов m_g зависит от коэффициента пористости e и имеет значения

e	0,6	0,8	1,2	1,6
m_g	4	3,4	2,5	2

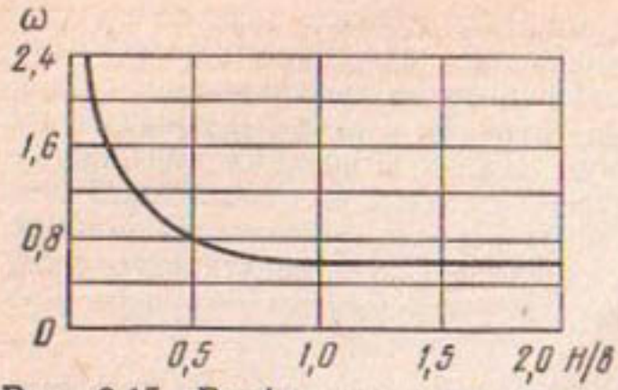


Рис. 2.15. График для определения коэффициента ω:
H — толщина слоя; *b* — ширина подошвы фундамента

Осадку во времени s_t бетонных и железобетонных сооружений ориентировочно можно определить по формуле

$$s_t = s\left(1 - e^{-\omega t}\right), \qquad (2.37)$$

где s — конечная осадка, вычисленная по формуле (2.30), см; e — основание натуральных логарифмов, $e=2{,}72$; ω — коэффициент с размерностью $[t]^{-1}$, определяемый по зависимости, показанной на рисунке 2.15; t — время, год.

Определение горизонтальных смещений сооружений. Горизонтальные смещения бетонных и железобетонных сооружений на основании, сложенном несвязными или связными грунтами, имеющими коэффициент консолидации $c_v \geqslant 4$, определяют по формулам:

для однородных оснований

$$u = \Phi F_h/(2lE_c); \qquad (2.38)$$

для неоднородных горизонтально-слоистых оснований

$$u = (F_h/2l)\sum_{i=1}^{n}[(\Phi_i - \Phi_{i-1})/E_{ci}], \qquad (2.39)$$

где F_h — горизонтальная сила, действующая на расчетном участке сооружения, кН; l — длина расчетного участка сооружения, м; E_c, E_{ci} — расчетные модули деформации грунтов соответствующих (рис. 2.16) смещаемых слоев (МПа), принимают для глинистых грунтов 1,2 E_{red}, для песчаных — 1,5 E_{red} [E_{red} определяют по формуле (2.33)]; n — число геологических слоев в пределах расчетной толщи H_d смещаемого слоя, $H_d=0{,}4\ (b+l_a)$, м (l_a — длина анкерного понура, м; b — ширина подошвы сооружения, м); Ф, Φ_i, Φ_{i-1} — функции параметров смещаемых слоев, определяемые по формуле

$$\Phi = 0{,}64\,(1+\nu)\,[(1-\nu)\ln(1+m_\Phi^2) + m_\Phi(3-2\nu)\operatorname{arctg}(1/m_\Phi)], \qquad (2.40)$$

где ν — коэффициент Пуассона; m_Φ — поправочный коэффициент, $m_\Phi=2H_d/b$ при вычислении функции Ф, $m_\Phi=2h'_i/b$ и $m_\Phi=2h'_{i-1}/b$ при вычислении Φ_i и Φ_{i-1}; h'_i и h'_{i-1} — глубина залегания подошвы i-го и $i-1$-го слоя.

Горизонтальные смещения u сооружений на основании, сложенном связными грунтами, имеющими коэффициент консолидации $c_v<4$, определяют лишь в том случае, когда касательные напряжения τ в основании по

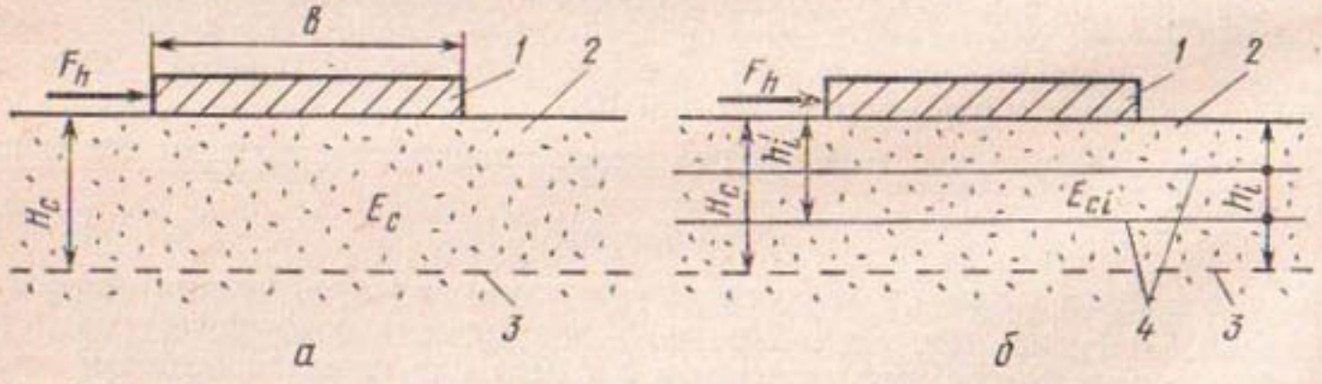


Рис. 2.16. Схема к определению горизонтальных смещений сооружений:
а — однородное основание; *б* — слоистое основание; *1* — сооружение; *2* — грунт; *3* — граница смещаемого слоя; *4* — граница геологических слоев; F_h — горизонтальная (сдвигающая) сила; b — ширина подошвы фундамента; H_c — расчетная толщина сжимаемого слоя; h_i — толщина i-го геологического слоя, находящегося в расчетной толще H_c смещаемого слоя; h_i' — глубина залегания подошвы i-го геологического слоя; E_c, E_{ci} — модули деформации грунтов смещаемых слоев

подошве фундамента сооружения больше касательных напряжений порога ползучести τ_{lim}. При показателе текучести грунта $0<I_L<0{,}5$ φ горизонтальные смещения u можно определять по формулам (2.38), (2.39), увеличив их на 35%. При $I_L>0{,}5$ u устанавливают по результатам исследований грунтов. Касательные напряжения порога ползучести вычисляют по формуле

$$\tau_{lim} = \sigma_{zp0} \operatorname{tg} \varphi_{II} + c_{II}^{c}, \qquad (2.41)$$

где σ_{zp0} — нормальное напряжение по подошве фундамента сооружения, $\sigma_{zp0}=p$, МПа; φ_{II} — угол внутреннего трения грунта при соответствующей влажности рассчитывают из условий неконсолидированно-недренированного сдвига, град; c^c_{II} — структурное сцепление, определяемое методом сдвига «плашек», МПа.

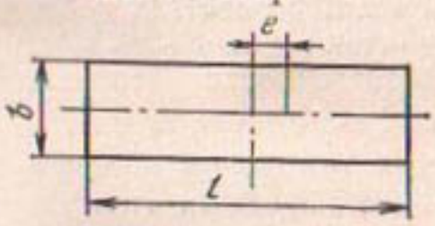
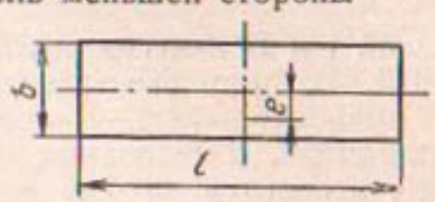
Предельные горизонтальные смещения

$$u_u = [2(1+\nu)/(E_H l b)]\, F_u \{H_u + 0{,}3 H_c [m/(1-m)]\}, \qquad (2.42)$$

где $E_н$ — модуль деформации грунта основания на глубине H_c, кПа (H_c — глубина сжимаемой толщи, м); ν, l и b — то же, что и в формулах (2.39), (2.40); F_u — предельная сдвигающая сила, кН; H_u — толщина смещаемого слоя к моменту достижения сооружением предельного состояния, м, $H_u = 0{,}4\,b + 0{,}3\,H_c$; m — безразмерный коэффициент, для песков средней плотности сложения и плотных принимают 0,7...0,8, для глинистых грунтов полутвердой и тугопластичной консистенции — 0,6...0,7.

Определение крена (наклона) сооружений. Крен бетонных и железобетонных сооружений может произойти в результате внецентренной передачи подошвой фундамента на грунт основания вертикальной составляющей нагрузки или в результате неодинаковой мощности слоев грунта под различными точками подошвы фундамента. Крен сооружений находят по разности осадок точек (крайних, как правило) сооружения: $i=(s_1-s_2)/a$ (s_1 и s_2 — соответственно осадка точек 1 и 2 сооружения, м; a — расстояние между этими точками, м).

2.25. Коэффициент k_e для расчета крена сооружений

Форма фундамента и направление действия момента	l/b	$2H/b$ (H — расчетная толщина линейно деформируемого слоя)							
		0,5	1	1,5	2	3	4	5	∞
Прямоугольная с моментом вдоль большей стороны 	1	0,28	0,41	0,46	0,48	0,50	0,50	0,50	0,50
	1,2	0,29	0,44	0,51	0,54	0,57	0,57	0,57	0,57
	1,5	0,31	0,48	0,57	0,62	0,66	0,68	0,68	0,68
	2	0,32	0,52	0,64	0,72	0,78	0,81	0,82	0,82
	3	0,33	0,55	0,73	0,83	0,95	1,01	1,04	1,17
	5	0,34	0,60	0,80	0,94	1,12	1,24	1,31	1,42
	10	0,35	0,63	0,85	1,04	1,31	1,45	1,56	2,00
Прямоугольная с моментом вдоль меньшей стороны 	1	0,28	0,41	0,46	0,48	0,50	0,50	0,50	0,50
	1,2	0,24	0,35	0,39	0,41	0,42	0,43	0,43	0,43
	1,5	0,19	0,28	0,32	0,34	0,35	0,36	0,36	0,36
	2	0,15	0,22	0,25	0,27	0,28	0,28	0,28	0,28
	3	0,10	0,15	0,17	0,18	0,19	0,20	0,20	0,20
	5	0,06	0,09	0,10	0,11	0,12	0,12	0,12	0,12
	10	0,03	0,05	0,05	0,06	0,06	0,06	0,06	0,07
Круглая с диаметром $d=b$	—	0,43	0,63	0,71	0,74	0,75	0,75	0,75	0,75

Примечание. При использовании расчетной схемы основания в виде линейно деформируемого полупространства коэффициент k_e принимают по графе, соответствующей $2H/b=\infty$.

В случае однородного и горизонтально слоистого основания при действии внецентренной нагрузки крен сооружений можно вычислить по формуле

$$i = \frac{1-\nu^2}{Ek_m} k_e \frac{8Ne}{a^3}, \qquad (2.43)$$

где ν, E — коэффициент (или средний коэффициент) Пуассона и модуль деформации (или средний модуль) грунтов в пределах сжимаемой толщи основания, кПа; k_m — коэффициент, учитываемый только при расчете крена сооружений на основании в виде линейно деформируемого слоя с модулем деформации грунтов $E \geqslant 10$ МПа, и только при ширине подошвы фундамента $b \geqslant 10$ м, $k_m = 1{,}35$ при $10 \leqslant b \leqslant 15$ и $k_m = 1{,}5$ при $b > 15$; k_e — коэффициент, принимаемый по таблице 2.25; a — диаметр круглой или сторона (ширина b или длина l) прямоугольной подошвы фундамента, в направлении которой действует момент (Ne), м; N — вертикальная составляющая равнодействующей всех нагрузок, передающихся на грунт основания подошвой фундамента, кН; e — эксцентриситет, м.

2.7. ФИЛЬТРАЦИОННЫЕ ДЕФОРМАЦИИ ГРУНТОВ ОСНОВАНИЙ СООРУЖЕНИЙ И ПРОГНОЗ ИХ ФИЛЬТРАЦИОННОЙ ПРОЧНОСТИ

Фильтрационные деформации грунтов — перемещение частиц грунта под силовым воздействием фильтрационного потока. Различают деформации безопасные и опасные (недопустимые). Если сила сопротивления частиц грунта перемещению больше фильтрационной, деформаций не будет. Критерием появления и допустимости фильтрационных деформаций грунтовых оснований гидротехнических сооружений служат градиент напора фильтрационного потока и показатели свойств грунтов.

Основные виды фильтрационных деформаций и критерии оценки их появления приведены в таблице 2.26.

Фильтрационная прочность. Это — способность грунта сопротивляться фильтрационным деформациям.

Общую фильтрационную прочность нескальных оснований оценивают критерием

$$I_{\text{est},m} \leqslant I_{\text{cr},m}/\gamma_n, \qquad (2.44)$$

где $I_{\text{est},m}$ — средний градиент напора в расчетной области фильтрации; $I_{\text{cr}m}$ — критический средний градиент напора, принимаемый на основании исследований грунтов в условиях, отвечающих реальным условиям эксплуатации сооружения, при их отсутствии и в предварительных расчетах — по аналогам или по таблице 2.27 (бóльшие значения назначают для более плотного грунта); γ_n — коэффициент надежности по ответственности сооружений (п. 2.3).

Местную фильтрационную прочность нескальных оснований в зонах выхода фильтрационного потока в НБ, на границе неоднородных грунтов или в дренажные устройства оценивают условием $I \leqslant I_{\text{cr}}$, где I — местный градиент напора в зоне выхода потока; I_{cr} — критический градиент напора (см. табл. 2.27).

Значения I, $I_{\text{est},m}$, $I_{\text{cr},m}$ для оснований сооружений I и II классов высотой более 10 м определяют по результатам исследований методом электрогидродинамических аналогий (ЭГДА), на аналоговых вычислительных машинах (АВМ) или точными решениями уравнений гидродинамики. В остальных случаях I, $I_{\text{est},m}$ допускается определять приближенно, используя методы коэффициентов сопротивления, фрагментов, удлиненной контурной фильтрации и др.

Местную фильтрационную прочность скальных оснований оценивают условием $v \leqslant v_{\text{cr}}$, где v — скорость фильтрации в трещинах скального основания, которую определяют делением фильтрационного расхода воды в задан-

ном направлении на суммарное живое сечение трещин в плоскости, перпендикулярной этому направлению, см/с; v_{cr} — критическая скорость фильтрации в трещинах, зависящая от типа заполняющего ее грунта, см/с. При ширине раскрытия трещин более 1 мм v_{cr}=50 см/с для глинистого заполнителя, 30 см/с — суглинистого, 15 см/с — супесчаного с $I \geqslant 0{,}03$. При ширине трещин менее 1 мм v_{cr} не нормировано.

Неотъемлемая часть дренажа гидротехнических сооружений — обратные фильтры. Их предусматривают на контакте дренажа (или пригрузки) и дренируемого тела плотины, ядра, экрана или основания. Назначение их — защита грунта основания или тела сооружения от фильтрационных деформаций на выходе фильтрационного потока в дренаж.

Обратный фильтр — несколько слоев несвязного грунта или искусственных минеральных материалов (щебеночных, гранулированных шлаков и др.) различной крупности, расположенных нормально к фильтрационным токам в порядке возрастания крупности частиц по ходу фильтрации (табл. 2.28). При соответствующем обосновании устраивают обратные фильтры из пористого бетона и других пористых материалов.

Основные требования к фильтрам — достаточная водопроницаемость, непросыпаемость частиц грунта из одного слоя в другой, некольматируемость, долговечность, водостойкость, морозостойкость, прочность, исключение внутренней суффозии и контактного размыва.

Число слоев обратного фильтра и их состав определяют на основании технико-экономического сравнения вариантов, стремясь к назначению возможно меньшего их числа.

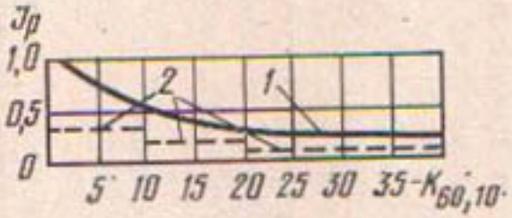
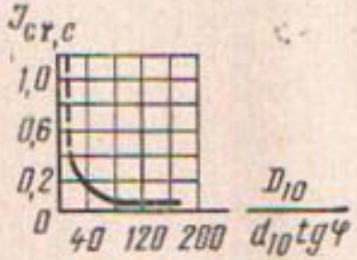
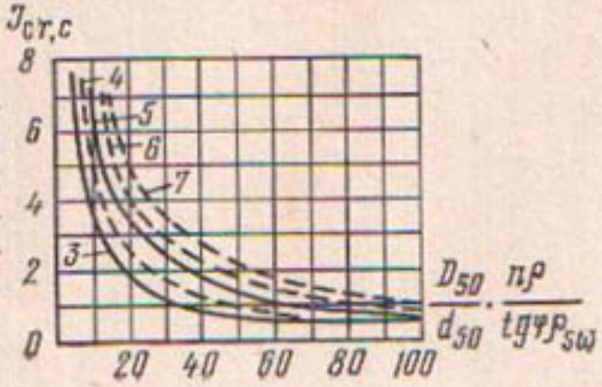
Зерновой состав фильтровых материалов подбирают с учетом физических характеристик дренируемого грунта и имеющихся местных материалов. Для плотин I и II классов его проверяют экспериментальным путем, а для плотин III и IV классов — расчетом. При этом возможны два случая: первый — известны параметры карьерного грунта и заданы кривые гранулометрического состава, расчетом определяют применимость грунтов для фильтра; второй — данные гранулометрического состава отсутствуют, их определяют из условия отсутствия фильтрационных деформаций. Для предварительного подбора фильтров используют графики, приведенные в таблице 2.28: если характеристики грунта, отложенные по осям, пересекаются в области допускаемых характеристик, грунт можно использовать для фильтра. Затем состав уточняют по данным проверки суффозионной прочности грунтов фильтра и защищаемых грунтов.

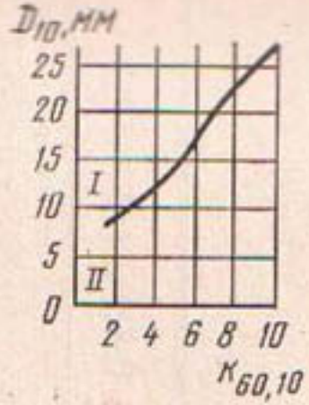
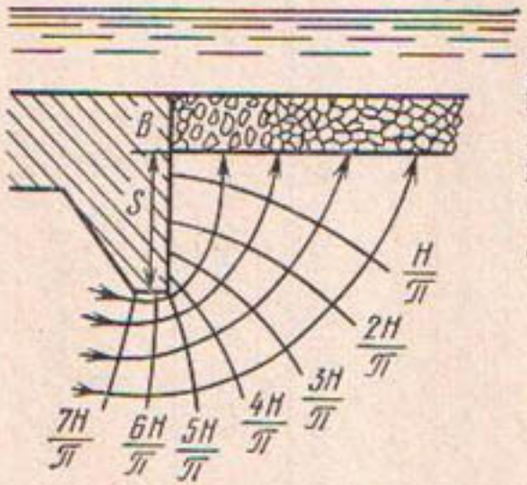
Коэффициент разнозернистости фильтровых материалов $k_{60,10}=d_{60}:d_{10}$ (d_{60} и d_{10} — размеры фракций грунта, масса которых вместе с массой более мелких фракций составляет соответственно 60 и 10% массы всего грунта) для обратных фильтров, дренажей и переходных слоев в зависимости от свойств защищаемого грунта должен удовлетворять условиям:

несуффозионный сыпучий	
для окатанных частиц песчаных и гравийных грунтов фильтра	$k_{60,10} \leqslant 20$
для щебенистых грунтов фильтра	$k_{60,10} \leqslant 25$
суффозионный сыпучий	$k_{60,10} \leqslant 15$
глинистый с числом пластичности $I_p \geqslant 0{,}07$ (при обосновании $I_p \geqslant 0{,}05$)	$k_{60,10} \leqslant 50$
глинистый переходный слой плотин толщиной более 3 м при соответствующем обосновании	$k_{60,10} \leqslant 50$
для фильтров из пористого бетона	$k_{60,10} \leqslant 12$
для фильтров, выполняемых отсыпкой материалов в воду	$k_{60,10} \leqslant 10$

Толщина слоев обратных фильтров, выполняемых из материалов с $k_{60,10} \leqslant 10$, должна быть $5\,d_{s,85}$ и больше, но не менее 0,2 м ($d_{s,85}$ — средний диаметр фракций грунта, масса которых вместе с массой более мелких фракций составляет 85% массы всего грунта). Для фильтров, выполняемых из материалов с $k_{60,10} > 10$, толщину слоев назначают по результатам опытных отсыпок.

2.26. Виды фильтрационных деформаций грунтов

Вид деформации, градиент напора	Характер процесса	Критерии возникновения	Расчетный график	Характерная область возникновения
Суффозия механическая $I_{est,p}$, $I_{cr,p}$ — расчетный и критический градиент фильтрации в суффозионной области	Вынос с поверхности или перемещение через крупные поры мелких частиц грунта под воздействием фильтрационного потока	$I_{est,p} \leqslant I_{cr,p}$ В восходящем потоке: $I_{est,p} < I_{min}$ Отсутствует при $k_{60,10} = d_{60}/d_{10} < 10...20$		Несвязные песчаные и гравелисто-песчаные грунты, не обладающие сцеплением
Контактный размыв $I_{cr,c}$ — критический градиент контактного размыва	Разрушение грунта на контакте с более крупнозернистым материалом под действием фильтрационного потока на контакте слоев	$I_{cr,c} = f(D_{10}/d_{10}, \operatorname{tg}\varphi)$, где D_{10} и d_{10} — диаметры частиц 10%-ного содержания в контактных слоях	 Экспериментальная кривая для средних грунтовых условий	В основании бетонных гидросооружений, дренажах под ними, в дренажах земляных плотин, в прослойках крупнозернистых грунтов
Контактный выпор $I_{cr,u}$ — критический градиент выпора	Отслаивание и вынос частиц грунта в зоне контакта из слоя с мелкими фракциями в слой с более крупными	Несвязные грунты $I_{cr,u} = f[(D_{50}/d_{50}) n\rho_w/\operatorname{tg}\varphi\rho_{sw}]$ D_{50}, d_{50} — диаметры частиц 50%-ного содержания соответственно верхнего и нижнего слоев; n, φ, ρ_{sw} — пористость, внутреннее трение и плотность водонасыщенного грунта		Выход фильтрационного потока в дренаж

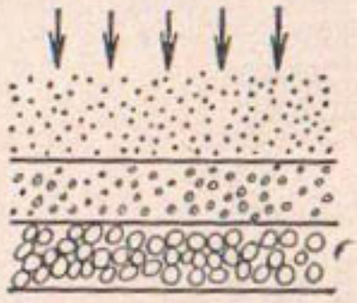
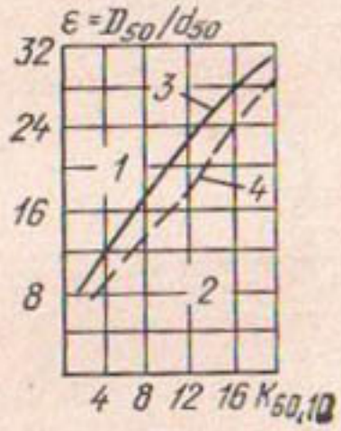
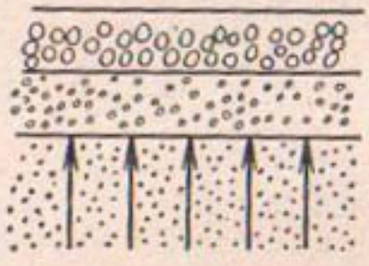
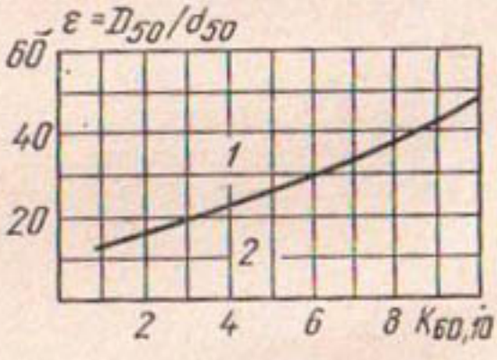
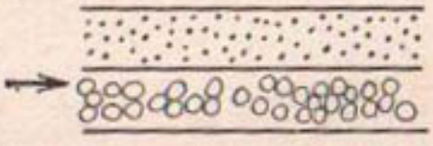
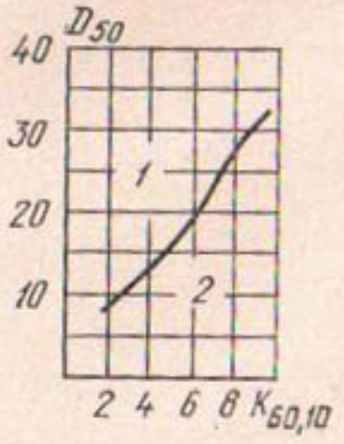
		Связные грунты: характеристики грунта D_{10} и $k_{60,10}$ лежат в области II (допустимые)		Основной вид фильтрационных деформаций глинистых грунтов
Фильтрационный выпор $I_{est,u}$, $I_{cr,u}$ — расчетный и критический градиент в зоне фильтрации	Отрыв и перемещение частиц грунта восходящим фильтрационным потоком	$I_{est,u} \leqslant I_{cr,u}$, где $I_{est,u}$ — расчетный градиент напора в месте выхода потока, $I_{est,u}=H/l$; H — напор на конце вертикального пути фильтрации l; $I_{cr,u}=\rho/\rho_w-(1-n)$	 При выходе в НБ $I_{cr,u} \leqslant 0{,}3$, при выходе в дренаж — $I_{cr,u} \leqslant 0{,}6$	Выход фильтрационного потока в НБ в примыкании сооружения к водонепроницаемой части флютбета, например к водобою

Примечания. 1. Наблюдается химическая суффозия — растворение содержащихся в грунте водорастворимых солей с выносом их фильтрационным потоком. 2. В зоне выхода фильтрационного потока в НБ и дренаж I_p, I_c рекомендуют определять на физических моделях. 3. На рисунках: *1* — кривая $I_{min,p}=f(k_{60,10})$; *2* — $I_{cr,p}$; *3, 4, 5, 6, 7* — кривые зависимости $I_{cr,u}=f(D_{50}/d_{50},\ n\rho/\mathrm{tg}\,\varphi\rho_{sw})$ при различных $k_{60,10}$; *3* — $k_{60,10}=2$; *4* — $k_{60,10}=4$; *5* — $k_{60,10}=6$; *6* — $k_{60,10}=8$; *7* — $k_{60,10}=10$; I — недопустимые характеристики грунта; II — допустимые.

2.27. Критический средний градиент напора элементов сооружения

Грунт основания	Понура	Экрана и ядра	Угла и призмы плотины
Глина, глинобетон	15	12	8...2
Суглинок	10	8	4...1,5
Супесь	3	2	2...1
Песок:			
средний	—	—	1
мелкий	—	—	0,75

2.28. Графики подбора слоев обратных фильтров

Направление фильтрационного потока	Тип обратного фильтра	График подбора слоев
Нисходящий		
Восходящий		
Параллельно слоям обратного фильтра		

Примечание. *1, 2* — области соответственно недопустимых и допустимых характеристик; *3, 4* — кривые для грунтов с окатанными и угловатыми частицами соответственно.

2.8. ОСНОВНЫЕ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ БЕТОННЫХ И ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ СООРУЖЕНИЙ

2.8.1. БЕТОН. ОСНОВНЫЕ ТРЕБОВАНИЯ И СВОЙСТВА

Основные показатели качества бетона: класс по прочности на сжатие B; класс по прочности на осевое растяжение B_t; марка по морозостойкости F; марка по водонепроницаемости W. К бетону гидротехнических сооружений предъявляют дополнительные требования — предельная растяжимость, стойкость против агрессивного воздействия воды, отсутствие вредного взаимодействия щелочей цемента с заполнителем, сопротивляемость истиранию потоком воды с наносами, минимальное тепловыделение, кавитационная стойкость.

Экономически наиболее эффективна, как показано в главе 4, зональная укладка бетона разных марок в тело плотины (см. рис. 4.15). Требования к бетону и выбор класса и марок его зависят от условий работы зон (табл. 2.29...2.32).

2.29. Основные требования к бетону для различных зон бетонных и железобетонных плотин

Требования к бетону	Зоны плотин (см. рис. 4.15)	
	бетонных	железобетонных
Прочность на сжатие	I...IV	I...III
Прочность на растяжение	I...III	I...III
Водонепроницаемость	II...III	II...III
Морозостойкость	I...II	I...II
Предельная растяжимость	I...IV	Не предъявляют
Стойкость против агрессивных вод	II...III	II...III
Сопротивляемость истиранию потоком воды при наличии взвешенных и влекомых наносов, а также стойкость против кавитации при скорости воды по поверхности бетона более 15 м/с	II	II
Тепловыделение при твердении бетона	I...IV	Предъявляют при обосновании

Примечание. Для плотин IV класса допускается не предъявлять требования по предельной растяжимости и тепловыделению.

Класс бетона по прочности на сжатие В определяют по сопротивлению осевому сжатию куба размером 15×15×15 см, испытанного в возрасте 180 сут или на момент загружения, если срок фактического загружения сооружения известен (для плотин обычно 1 год). При других размерах образцов, полученных при испытаниях, прочность делят на переводные коэффициенты, приведенные в таблице 2.31. Классы бетона по прочности на сжатие: В3,5; В5; В7,5; В10; В12,5; В15; В20; В25; В30; В35; В40; В45; В50; В55; В60. Для плотин с объемом бетона более 1 млн. м³ допускается устанавливать дополнительные промежуточные классы бетона. Соотношение между классами бетона, установленными СНиП 2.03.01—84, стандартом СЭВ 1406—78 и принятыми ранее проектными марками бетона дано в таблице 2.32.

Класс по прочности на осевое растяжение B_t принимают по сопротивле-

2.30. Возможные классы и марки бетона для различных зон гидротехнических сооружений

Зоны сооружений	Классы и марки бетона	Ориентировочные расходы цемента, кг/м³
	Массивные гравитационные плотины	
Бетон внутренней зоны	В15, W4 (В12,5, W2)	200 (160)
Бетон наружной подводной зоны	В15, W8, F100 (В20, W8, F100)	230 (250)
Бетон надводной зоны	В15, W8, F150 (В20, W8, F150)	240 (260)
Бетон зоны переменного уровня воды в ВБ	В20, W8, F250 (В22,5, W8, F300)	270 (290)
Бетон фундаментных частей в подошве плотин (сопряжение с основанием)	В15, W10, F100 (В20, W10, F100)	240 (260)
	Арочно-гравитационные плотины	
Бетон внутренней зоны	В12,5, W4, (В15, W6)	180 (220)
Бетон наружной подводной зоны	В15, W10, F100 (В20, W10, F100)	240 (260)
Бетон надводной зоны	В15, W10, F150 (В20, W10, F150)	250 (270)
Бетон зоны переменного уровня воды в ВБ	В20, W10, F250 (В22,5, W10, F300)	280 (300)
Бетон фундаментных частей в подошве плотины (сопряжение с основанием)	В15, W12, F100 (В20, W12, F100)	250 (270)
	Гравитационные и арочно-гравитационные плотины	
Бетон зоны переменного уровня воды в НБ	Требует обоснования в зависимости от климатических и эксплуатационных условий	
Бетон облицовки водосливной грани	Требует обоснования в зависимости от скорости потока с проведением соответствующих исследований	
	Арочные плотины	
Бетон арочных перекрытий	В22,5, W10, F200 (В27,5, W10, F300)	290 (325)

Примечание. В скобках дан вариант свойств бетона.

2.31. Переводные коэффициенты для оценки прочности образцов разных форм и размеров

Размер образца, см	Прочность образца при сжатии, МПа			
	14,3	20,4	30,6	40,8
Кубы 30×30×30	1,06	1,05	1,05	1,04
» 20×20×20	1,00	1,00	1,00	1,00
» 15×15×15	0,96	0,94	0,92	0,90
» 10×10×10	0,87	0,85	0,83	0,81
» 7,07×7,07×7,07	0,91	0,88	0,86	0,84
Цилиндры 19,5×39	1,24	1,24	1,26	1,28
» 15×30	1,19	1,20	1,24	1,25

2.32. Соотношение между марками бетона (СНиП 21—75) и классами бетона (СНиП 2.03.01—84) по прочности на сжатие

Показатели сравнения	Марка бетона					
	М 35	М 50	М 75	М 100	М 150	М 150
	Класс бетона					
	В2,5	В3,5	В5	В7,5	В10	В12,5
Условная марка (кроме ячеистого бетона)	32,74	45,84	65,48	98,23	130,97	163,71
Отличие условной марки от марки, %	—6,5	—8,1	—12,7	—1,8	—12,7	+9,1

Показатели сравнения	Марка бетона					
	М 200	М 250	М 300	М 300	М 350	М 350
	Класс бетона					
	В15	В20	В22,5	В25	В25	В27,5
Условная марка (кроме ячеистого бетона)	196,45	261,93	294,68	327,42	327,42	360,16
Отличие условной марки от марки, %	—1,8	+4,8	—1,8	+9,1	—6,45	+2,9

Показатели сравнения	Марка бетона						
	М 400	М 450	М 500	М 600	М 700	М 700	М 800
	Класс бетона						
	В30	В35	В40	В45	В50	В55	В60
Условная марка (кроме ячеистого бетона)	392,9	458,39	523,87	589,35	654,84	720,32	785,81
Отличие условной марки от марки, %	—1,8	+1,9	+4,8	—1,8	—6,45	+2,9	—1,8

Примечание. Условная марка — средняя прочность бетона (в кгс/см²) в серии образцов 15×15×15 см, при номинальном коэффициенте вариации v; условная марка равна $B/[0{,}0980665(1-1{,}64v)]$, где B — численное значение класса бетона, МПа.

нию растяжению стандартных образцов, испытанных в возрасте 180 сут при нормальном твердении. Его назначают в тех случаях, когда работа конструкции определяется растянутым бетоном или не допускается образование трещин. Классы тяжелого бетона: $B_t0{,}8$; $B_t1{,}2$; $B_t1{,}6$; B_t2; напрягаемого мелкозернистого и легкого бетонов: $B_t2{,}4$; $B_t2{,}8$; $B_t3{,}2$.

Марка бетона по морозостойкости F определяется числом циклов попеременного замораживания и оттаивания образцов, испытываемых в возрасте 28 сут в насыщенном водой состоянии без снижения прочности бетона более чем на 15%. Марки гидротехнического бетона по морозостойкости — F50; F75; F100; F150; F200; F300; F400; F500 — назначают с учетом климатических условий, характеризующихся среднемесячной температурой наиболее холодного месяца; для умеренных условий — от 0 до —10 °С; суровых — от —10 до —20 °С; особо суровых — ниже —20 °С. Для надводной зоны: при умеренных условиях принимают марку не ниже F50; при суровых — F100 и выше; при особо суровых — F200 и выше. Для зоны перемен-

2.33. Марки морозостойкого бетона для зоны переменного уровня воды и водослива

Климатические условия	Число циклов замораживания и оттаивания					
	до 50	50...75	75...100	100...150	150...200	более 200
Умеренные	F50	F100	F150	F200	F300	F400
Суровые	F100	F150	F200	F300	F400	F500
Особо суровые	F150	F200	F300	F400	F500	F600

ного уровня и водослива марку бетона по морозостойкости назначают по таблице 2.33.

С увеличением возраста бетона его морозостойкость повышается.

Марку бетона по водонепроницаемости W принимают по наибольшему давлению воды, при котором не наблюдается ее просачивания через образцы в условиях стандартного испытания в возрасте 180 сут. Марку по водонепроницаемости — W2, W4, W6, W8, W10, W12, W14 — назначают в зависимости от градиента напора I, равного отношению максимального напора к толщине конструкции или к толщине бетона наружной зоны при зональном бетоне (табл. 2.34).

2.34. Марки водонепроницаемого бетона

Температура воды на контакте с сооружением, °С	Градиент напора					
	до 5	5...10	10...15	15...20	20...30	30...40
До +10	W2	W4	W6	W8	W10	W12
10...30	W4	W6	W8	W10	W12	W14

При технико-экономическом обосновании можно применять во внутренних зонах марку W2.

Износостойкость бетона, применяемого в зонах абразивного износа, оценивают коэффициентом износа γ_u. Для износостойких бетонов с $\gamma_u \leqslant 1$ кг/(м²×ч) применяют марки В22,5; W8; F300 и выше; допускается применение торкрета с $\gamma_u \approx 0{,}51...1$ кг/(м²·ч). При предельном насыщении потока наносами 3% и их крупности 50...100 мм допускаемые скорости для бетона приведены в таблице 2.35. Рекомендуемая толщина облицовок 0,4...0,6.

2.35. Допускаемые скорости потока для износостойких бетонов

Марка бетона	Коэффициент износа γ_u, кг/(м²·ч)	Допускаемые скорости, м/с
*B*25	0,51...1	4...6
*B*30	0,31...0,51	6...10
*B*40	0,31	10...12
*B*45	0,31	12...15

Кавитационная стойкость характеризуется интенсивностью кавитационной эрозии i_{max}, зависящей от относительного параметра кавитации $k_{rel}=k/k_{cr}$, где k — параметр кавитации, k_{cr} — критический параметр кавитации. При $k_{rel}=0{,}675$ интенсивность кавитационной эрозии бетона равна при марке бетона *B*25 $i_{max25}=0{,}13$, для остальных марок $i_{max}=i_{max25}/n$, где n — коэффициент относительной кавитационной стойкости, равный $n=1{,}6$ при *B*30, $n=15...20$ при *B*40...*B*45 (со щебнем, гравием), $n=30...50$ для цементных растворов с R до 70 МПа, $n \leqslant 15$ для активированного торкрета, $n \leqslant 150$ для полимерных растворов на основе мономера ФА с R 70...100 МПа.

При $k_{rel} \neq 0{,}675$ и скорости водного потока $v = 30$ м/с:

$$i_{30} = 1{,}9\sqrt{0{,}95 - k_{rel}}\, i_{max} \qquad \text{при } k_{rel} \geqslant 0{,}675;$$

$$i_{30} = 1{,}83\sqrt{k_{rel} - 0{,}375}\, i_{max} \qquad \text{при } k_{rel} < 0{,}675.$$

При $k_{rel} \neq 0{,}675$ и любой скорости потока интенсивность кавитационной эрозии

$$i \simeq i_{30}\,(v/30)^{7\ldots8}.$$

Для бетонов с $R_b/R_{bt} = 25/2{,}3$; 29/3,0; 40/3,9; 45,4/4,1 в возрасте 28 сут соответственно $i_{30} = 0{,}054$; 0,021; 0,013; 0,006 см/ч.

Тепло- и влагофизические свойства бетона характеризуются следующими коэффициентами:

линейной усадки, $\frac{\text{мм/мм}}{\text{г/г}}$	$\alpha_h = 3 \cdot 10^{-2}$
линейного набухания, $\frac{\text{мм/мм}}{\text{г/г}}$:	
при гигроскопическом увлажнении	$\alpha_w = 3 \cdot 10^{-2}$
при контакте бетона с водой	$\alpha_w = 5 \cdot 10^{-3}$
линейного расширения, 1/град	$\alpha = (0{,}75\ldots1{,}1)\,10^{-5}$
теплопроводности, Вт/(м²·град):	
в период строительства	$\alpha = 2{,}56$
в период эксплуатации	$\alpha = 1{,}98$
температуропроводности, м²/ч	$a = 4 \cdot 10^{-3}$
теплоотдачи с открытой поверхности бетона, Вт/(м²·град):	
в воздух для скорости ветра до	
2 м/с	$\beta = 5{,}8\ldots8{,}14$
2...4 м/с	$\beta = 15{,}1\ldots17{,}4$
>4 м/с	$\beta = 23{,}3$
внутрь полых швов, шахт, тепляков	$\beta = 7\ldots11{,}6$
в воду	$\beta = \infty$
удельная теплоемкость, Дж/(кг·град)	$C_e = 1 \cdot 10^3$

Теплоемкость бетона после замерзания понижается. Тепловыделение равно: $Q_\tau = Q_{max}\,[1 - (1 + A_{20}\,\tau)^{-n}]$, где τ — время; Q_{max} — максимальное тепловыделение к моменту окончания гидратации: $Q_{max} = q$Ц (q — удельное тепловыделение, Дж/кг, табл. 2.36; Ц — расход цемента, кг/м³); A_{20} — коэффициент роста тепловыделения при постоянной температуре твердения 20 °С, $A_{20} = 0{,}012\ldots0{,}015$ ч$^{-1}$; n — эмпирический коэффициент, зависящий от свойств цементов, например для портландцемента $n = 0{,}833$.

2.36. Удельное тепловыделение бетона, 10^3 Дж/кг

Тип цемента	Марка цемента	Время тепловыделения, сут			
		3	7	28	90
Портландцемент	500	293	335	385	398
	400	251	293	343	356
	300	209	251	293	301
Пуццолановый Портландцемент	400	209	264	322	335
	300	176	230	272	280
Шлакопортландцемент	400	209	264	322	335
	300	176	230	272	280

Срок твердения (возраст) бетона, отвечающий его классам по прочности на сжатие, осевое растяжение и марке по водонепроницаемости, для конструкций речных гидротехнических сооружений принимают, как правило, 180 сут; по морозостойкости — 28 сут. Если известны сроки фактического

загружения конструкций, способы их возведения, условия твердения, вид и качество цемента допускается устанавливать марку бетона в другом возрасте. Для сборных, в том числе и предварительно-напряженных конструкций, отпускную прочность бетона принимают не менее 70% прочности соответствующего класса.

2.8.2. НОРМАТИВНЫЕ И РАСЧЕТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ БЕТОНА

Нормативные сопротивления бетона: *сопротивление осевому сжатию* призм (призменная прочность) R_{bn} и *сопротивление осевому растяжению* R_{btn} приведены в таблице 2.37.

Группы мелкозернистых бетонов включают (табл. 2.37 и 2.38): А — бетоны естественного твердения с модулем крупности свыше 2; Б — то же, с модулем крупности 2 и менее; В — бетоны, подвергнутые автоклавной обработке. Для ячеистых бетонов значения сопротивлений приведены при средней влажности бетона 10%. Для керамзито- и перлитобетона на вспученном перлитовом песке значения R_{btn}, $R_{btn,ser}$, R_{bt} принимают кака для легкого бетона на пористом песке, умножив на коэффициент 0,85. Для поризованного бетона значения R_{bn}, $R_{b,ser}$, R_b принимают такими же, как и для легкого бетона, а значения R_{btn}, $R_{bt,ser}$, R_{bt} умножают на коэффициент 0,7. Для напряженного бетона значения R_{bn}, $R_{b,ser}$, R_b принимают такими же, как и для тяжелого бетона, а значения R_{btn}, $R_{bt,ser}$, R_{bt} умножают на коэффициент 1,2.

Расчетные сопротивления для предельных состояний первой и второй группы определяют делением нормативных сопротивлений на соответствующие коэффициенты надежности по бетону при сжатии γ_b и при растяжении γ_{bt}. Для бетона тяжелого и на пористых заполнителях для первого предельного состояния: $\gamma_b=1{,}3$; при назначении класса по прочности на сжатие $\gamma_{bt}=1{,}5$; по прочности на растяжение $\gamma_{bt}=1{,}3$. Для второго предельного состояния $\gamma_b=\gamma_{bt}=1$. Расчетные сопротивления бетона приведены: для предельных состояний второй группы в таблице 2.37, для предельных состояний первой группы в зависимости от класса по прочности на сжатие — в таблице 2.38.

Сопротивление бетонов тяжелых, напрягающих, мелкозернистых и легких осевому растяжению R_{btn} для предельных состояний первой группы в зависимости от класса бетона по прочности на осевое растяжение имеет следующие значения:

класс бетона	$B_t0{,}8$	$B_t1{,}2$	$B_t1{,}6$	B_t2	$B_t2{,}4$	$B_t2{,}8$	$B_t3{,}2$
R_{btn}, МПа	0,62	0,93	1,25	1,55	1,85	2,15	2,45

При конкретных расчетах сопротивления бетона умножают на коэффициенты условий работы бетона γ_{bi}, которые для второй группы предельных состояний равны 1, а для первой принимают следующие значения: при особых сочетаниях нагрузок для бетонных конструкций $\gamma_{b2}=1{,}1$; для железобетонных конструкций — плитных и ребристых при толщине плиты (ребра) 60 см и более $\gamma_{b3}=1{,}15$, менее 60 см — 1; для бетонных конструкций $\gamma_{b4}=0{,}9$.

При многократно повторяющейся нагрузке (расчеты на выносливость) для первой и второй группы предельных состояний расчетное сопротивление бетона умножают на коэффициент γ_{bl} (табл. 2.39), зависящий от коэффициента асимметрии цикла ρ_b, $\rho_b=\sigma_{min}/\sigma_{max}$ (σ_{min} и σ_{max} — наименьшее и наибольшее напряжения в бетоне в пределах цикла изменения нагрузки).

Модуль упругости. Диаграмма напряжения — деформации бетона (σ—ε) при растяжении близка к линейной (рис. 2.17). При сжатии линейный участок ОА отвечает напряжению $\sigma\approx 0{,}3\,R_{bn}$; при $\sigma>0{,}3\,R_{bn}$ на криволинейном участке обычно учитывают деформацию ползучести. Линейная зависимость соответствует мгновенному приложению нагрузки. *Начальный модуль упру-*

2.37. Нормативные сопротивления бетона R_{bn}, R_{btn}, МПа, и расчетные сопротивления бетона для предельных состояний второй группы $R_{b,ser}$ и $R_{bt,ser}$, МПа

Вид сопротивления	Бетон	Класс бетона по прочности на сжатие								
		B1	B1,5	B2	B2,5	B3,5	B5	B7,5	B10	B12,5
Сжатие осевое (призменная прочность) R_{bn} и $R_{b,ser}$	Тяжелый и мелкозернистый	—	—	—	—	2,7	3,5	5,5	7,5	9,5
	Легкий	—	—	—	1,9	2,7	3,5	5,5	7,5	9,5
	Ячеистый	0,95	1,4	1,9	2,4	3,3	4,6	6,9	9,0	10,5
Растяжение осевое R_{btn} и $R_{bt,ser}$	Тяжелый	—	—	—	—	0,39	0,55	0,70	0,85	1,00
	Мелкозернистый групп:									
	А	—	—	—	—	0,39	0,55	0,70	0,85	1,00
	Б	—	—	—	—	0,26	0,40	0,60	0,70	0,85
	В	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	Легкий при мелком заполнителе:									
	плотном	—	—	—	0,29	0,39	0,55	0,70	0,85	1,00
	пористом	—	—	—	0,29	0,39	0,55	0,70	0,85	1,00
	Ячеистый	0,14	0,22	0,26	0,31	0,41	0,55	0,63	0,80	1,00

Вид сопротивления	Бетон	Класс бетона по прочности на сжатие									
		B15	B20	B25	B30	B35	B40	B45	B50	B55	B60
Сжатие осевое (призменная прочность) R_{bn} и $R_{b,ser}$	Тяжелый и мелкозернистый	11,0	15,0	18,5	22,0	25,5	29,0	32,0	36,0	39,5	43,0
	Легкий	11,0	15,0	18,5	22,0	25,5	29,0	—	—	—	—
	Ячеистый	11,5	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Растяжение осевое R_{btn} и $R_{bt,ser}$	Тяжелый	1,15	1,40	1,60	1,80	1,95	2,10	2,20	2,30	2,40	2,50
	Мелкозернистый групп:										
	А	1,15	1,40	1,60	1,80	1,95	2,10	—	—	—	—
	Б	0,95	1,15	1,35	1,50	—	—	—	—	—	—
	В	1,15	1,40	1,60	1,80	1,95	2,10	2,20	2,30	2,40	2,50
	Легкий при мелком заполнителе:										
	плотном	1,15	1,40	1,60	1,80	1,95	2,10	—	—	—	—
	пористом	1,10	1,20	1,35	1,50	1,65	1,80	—	—	—	—
	Ячеистый	1,05	—	—	—	—	—	—	—	—	—

2.38. Расчетные сопротивления бетона для предельных состояний первой группы R_b и R_{bt}, МПа

Вид сопротивления	Бетон	Класс бетона по прочности на сжатие								
		B1	B1,5	B2	B2,5	B3,5	B5	B7,5	B10	B12,5
Сжатие осевое (призменная прочность) R_b	Тяжелый и мелкозернистый	—	—	—	—	2,1	2,8	4,5	6,0	7,5
	Легкий	—	—	—	1,5	2,1	2,8	4,5	6,0	7,5
	Ячеистый	0,63	0,95	1,3	1,6	2,2	3,1	4,6	6,0	7,0
Растяжение осевое R_{bt}	Тяжелый	—	—	—	—	0,26	0,37	0,48	0,57	0,66
	Мелкозернистый групп:									
	А	—	—	—	—	0,26	0,37	0,48	0,57	0,66
	Б	—	—	—	—	0,17	0,27	0,40	0,45	0,57
	В	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	Легкий при мелком заполнителе:									
	плотном	—	—	—	0,20	0,26	0,37	0,48	0,57	0,66
	пористом	—	—	—	0,20	0,26	0,37	0,48	0,57	0,66
	Ячеистый	0,06	0,09	0,12	0,14	0,18	0,24	0,28	0,39	0,44

Вид сопротивления	Бетон	Класс бетона по прочности на сжатие									
		B15	B20	B25	B30	B35	B40	B45	B50	B55	B60
Сжатие осевое (призменная прочность) R_b	Тяжелый и мелкозернистый	8,5	11,5	14,5	17,0	19,5	22,0	25,0	27,5	30,0	33,0
	Легкий	8,5	11,5	14,5	17,0	19,5	22,0	—	—	—	—
	Ячеистый	7,7	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Растяжение осевое R_{bt}	Тяжелый	0,75	0,90	1,05	1,20	1,30	1,40	1,45	1,55	1,60	1,65
	Мелкозернистый групп:										
	А	0,75	0,90	1,05	1,20	1,30	1,40	—	—	—	—
	Б	0,64	0,77	0,90	1,00	—	—	—	—	—	—
	В	0,75	0,90	1,05	1,20	1,30	1,40	1,45	1,55	1,60	1,65
	Легкий при мелком заполнителе:										
	плотном	0,75	0,90	1,05	1,20	1,30	1,40	—	—	—	—
	пористом	0,74	0,80	0,90	1,00	1,10	1,20	—	—	—	—
	Ячеистый	0,46	—	—	—	—	—	—	—	—	—

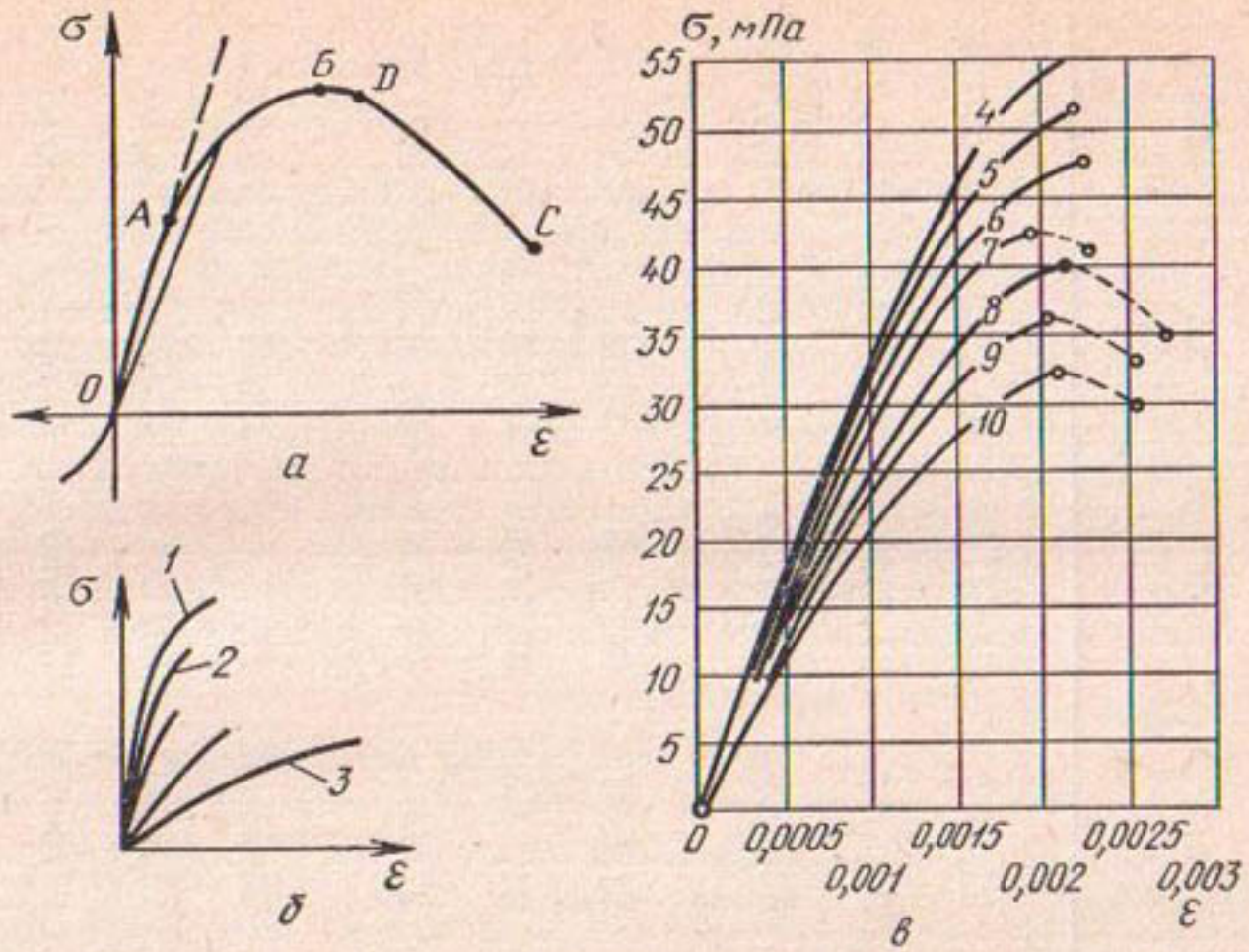


Рис. 2.17. Зависимость напряжения в бетоне от деформации $\sigma=f(\varepsilon)$:

а — при постоянной скорости деформирования; *б* — при разной длительности нагружения; *в* — при разной скорости приложения нагрузки; *1, 2, 3* — время испытаний соответственно 0,08 с, 2 мин ∞; *4...10* — время приложения нагрузки 0,06, 0,13, 0,26, 0,59, 3900, 29 300, 732 000 с

гости бетона E_b (МПа) в возрасте более 180 сут приведен в таблице 2.40; при возрасте бетона менее 180 сут его определяют по формуле

$$E_b = 10^5/\{1,7 + 360/a\,[\ln(t/180) + 5,2]\}, \qquad (2.45)$$

где a — безразмерный параметр, принимаемый по таблице 2.40 (знаменатель). Для сооружений I класса начальный модуль уточняют экспериментально.

2.39. Коэффициент условий работы бетона при многократном повторении нагрузки

Состояние бетона по влажности	Коэффициент асимметрии цикла							
	0...0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8
Естественной влажности	0,65	0,7	0,75	0,8	0,85	0,9	0,95	1
Водонасыщенный	0,45	0,5	0,6	0,7	0,8	0,85	0,95	1

При расчетах плотин на общую прочность, по деформациям и по раскрытию строительных швов и трещин модуль упругости E_{bd} равен: при возведении плотин столбчатыми массивами или с перевязкой блоков $E_{bd}=E_b[1-0,04(n_j-n_{js})]$; при послойном способе бетонирования $E_{bd}=0,75\,E_b\,[1-0,04\,(3/h_{bl}-1)]$; во всех случаях $0,65\,E_b \leqslant E_{bd} \leqslant 30\cdot10^3$ МПа (n_j — число вертикальных швов бетонирования на подошве плотины; n_{js} — число межстолбчатых или межсекционных швов, для которых применяют технологическое обжатие; h_{bl} — высота блока бетонирования, м).

Начальный коэффициент поперечной деформации бетона ν (коэффициент Пуассона) принимают 0,2 для всех видов бетона, а *модуль сдвига* $G=0,4\,E_b$.

2.40. Начальный модуль упругости ($E_в \cdot 10^{-3}$ МПа) в возрасте 180 сут и более для классов бетона по прочности на сжатие

Осадка конуса, см	Максимальный размер крупного заполнителя $Д_{max}$, мм	В5	В7,5	В10	В12,5	В15	В20	В25	В30
<4	40	23,5/27	28/37	31/45	33,5/54	35,5/62	38,5/77	40,5/90	42,5/106
	80	26,0/32	30,5/44	34/56	36,5/66	38,5/77	41,5/98	43,5/116	45,0/133
	120	28,0/37	33/52	36,5/66	38,5/77	40,5/90	43,5/116	45,5/139	47,0/162
4...8	40	19,5/20	24/28	27/35	29,5/41	31,5/47	34,5/58	37/68	39/80
	80	22,5/25	28/37	30/42	32,5/50	34,5/58	37,5/71	40/86	42/102
	120	24,5/29	29/40	32,5/50	35,0/60	37/68	40/86	42/102	43,5/116
>8	40	13,0/12	16/15	18,0/18	21,0/22	23/26	27/35	30/42	32,5/50
	80	15,0/14	19/19	22/24	24,5/29	26,5/33	30/42	33/52	35/60
	120	17,5/17	21,5/23	24/29	27,0/35	29/40	32,5/50	35/60	37/68

Примечание. Числитель — $E_в$ в возрасте более 180 сут, знаменатель — параметр a в формуле (2.45).

2.8.3. АРМАТУРА. ВИДЫ И ХАРАКТЕРИСТИКИ

Виды и классы арматуры, применяемой для армирования железобетонных конструкций гидротехнических сооружений:

стержневая арматурная сталь: горячекатаная — гладкая класса А-I, периодического профиля классов А-II, А-III, А-IV, А-V, А-VI; термически и термомеханически упрочненная — периодического профиля классов Ат-III, Ат-IV, Ат-V, Ат-VI;

проволочная арматурная сталь: холоднотянутая проволока — обыкновенная периодического профиля класса Вр-I, высокопрочная гладкая класса В-II и периодического профиля класса Вр-II; арматурные канаты — спиральные семипроволочные класса К-7, девятнадцатипроволочные класса К-19.

Арматуру выбирают в зависимости от типа конструкции, наличия предварительного напряжения, условий строительства и эксплуатации сооружений (табл. 2.41).

2.41. Область использования классов арматуры

Арматура и элементы конструкций	Класс арматуры	
	преимущественной	допускаемой
	Ненапрягаемая арматура	
Монтажная	А-I	
Конструктивная:		
поперечная	А-III	А-II, А-I
продольная	А-III	А-II, А-I
Сварные сетки и каркасы	А-III, Вр-I (d=3...5 мм)	А-I, А-II
Вязаные сетки и каркасы		
Конструкции под давлением газа, жидкости, сыпучих тел	А-I, А-II	А-III, Вр-I
	Напрягаемая арматура	
Конструкции		
длиной менее 12 м	Ат-V, Ат-VI	В-II, Вр-II, К-7, К-19, Ат-IV, А-V, А-VI, А-IIIв
длиной более 12 м	В-II, Вр-II, К7, К-19, А-V, А-VI	А-IV, Ат-IVС, А-IIIв
Конструкции под давлением газа, жидкости, сыпучих тел	А-V, А-VI, В-II, К-7, К-19	А-IV, А-IIIв
Конструкции в агрессивной среде	А-IV, Ат-IVК, Ат-СК, Ат-VIК (К — стойкие к коррозии)	—
	Арматура монтажных петель	
Монтажные петли сборных конструкций	Ас-II (10 ГТ) А-I (ВСт3 сп 2)	А-I (ВСт3 пс 2) только при t>40 °С

Сопротивление арматуры растяжению — нормативное R_{sn}, расчетное для первой группы предельных состояний R_s (продольная) и R_{sw} (поперечная хомутов и отогнутых стержней), расчетное для второй группы предельных состояний $R_{s,ser}$ — приведено в таблицах 2.42 и 2.43.

Расчетное сопротивление сжатию R_{sc} проволочной арматуры дано в таблице 2.43; для стержневой арматуры класса Вр-I принимают R_{sc}=375 МПа

2.42. Нормативные и расчетные сопротивления стержневой арматуры, МПа

Класс арматуры	R_{sn}, $R_{s,ser}$	R_s	R_{sw}	R_{sc}
A-I	235	225	175	255
A-II	295	280	225	280
A-III диаметром, мм				
6...8	390	355	285(255)	355
10...40	390	365	290(255)	365
A-IV	590	510	405	400
A-V	785	680	545	400
A-VI	980	815	650	400
A-IIIв с контролем удлинения и напряжения	540	490	390	200
только удлинения	540	450	360	200

Примечание. В скобках дано значение R_{sw} для арматуры диаметром менее 1/3 диаметра продольных стержней.

2.43. Нормативные и расчетные сопротивления проволочной арматуры, МПа

Класс арматуры	Диаметр d, мм	R_{sn}, $R_{s,ser}$	R_s	R_{sw}
Bp-I	3	410	375	270(300)
	4	405	365	265(295)
	5	395	360	260(290)
B-II	3	1490	1240	990
	4	1410	1180	940
	5	1335	1110	890
	6	1255	1050	835
	7	1175	980	785
	8	1100	915	730
Bp-II	3	1460	1215	970
	4	1370	1145	915
	5	1255	1045	835
	6	1175	980	785
	7	1100	915	730
	8	1020	850	680
K-7	6	1450	1210	965
	9	1370	1145	915
	12	1335	1110	890
	15	1295	1080	865
K-19	14	1410	1175	940

Примечание. Величины R_{sw} в скобках даны для случая применения арматуры Bp-I в вязаных каркасах; арматурная проволока и канаты применяют во всех случаях при температуре не ниже —75 °С.

при $d=3$ мм, 365 МПа при $d=4$ мм, 360 МПа при $d=5$ мм, для всех остальных классов арматуры $R_{sc}=400$ МПа.

Расчетные сопротивления арматуры растяжению для предельных состояний первой группы определяют по формуле

$$R_s=R_{sn}/\gamma_s,$$

где γ_s — коэффициент надежности арматуры:

для стержневой классов A-I и A-II		1,05
	A-III	1,10 ($d = 6...8$ мм)
		1,07 ($d = 10...40$ мм)
	A-IV и A-V	1,15
	A-VI	1,20
	A-III с контролем удлинения и напряжения	1,20
	только удлинения	1,10
для проволочной классов B-II, Bp-II, K-7, K-19		1,20

Для предельных состояний второй группы $\gamma_s = 1$ и $R_s = R_{sn}$ (см. табл. 2.44, 2.45).

Модуль упругости арматуры E_s, МПа, имеет следующие значения: для стержневой классов A-I, A-II—$21 \cdot 10^4$; A-III—$20 \cdot 10^4$; A-IV, A-V, A-VI—19×10^4; A-IIIв—$18 \cdot 10^4$; для проволочной классов B-II, Bp-II—$20 \cdot 10^4$; K-7, K-19—$18 \cdot 10^4$; Bp-1—$17 \cdot 10^4$.

Неупругие деформации в бетоне сжатой зоны при расчетах на выносливость железобетонных конструкций учитывают снижением модуля упругости бетона E_b по таблице 2.42 с помощью коэффициента приведения арматуры к бетону n:

класс бетона	B15	B20	B25	B30	B40	B45
n	25	23	20	15	10	10

При практических расчетах расчетные сопротивления арматуры (см. табл. 2.42, 2.43) для предельных состояний первой группы снижают (или повышают), умножив на соответствующие коэффициенты работы γ_{si},

при поперечной нагрузке:	
на арматуру	$\gamma_{s1} = 0,8$
на сварные каркасы	$\gamma_{s2} = 0,9$
для элементов из легкого бетона класса B7,5 и ниже	$\gamma_{s7} = 0,8$
для элементов из ячеистого бетона класса B7,5 и ниже	
при продольном сжатии	$\gamma_{s8} = (190 + 40B)/R_{sc} \leqslant 1$
при продольном растяжении	$\nu_{s8} = 25B/R_{sw} \leqslant 1$ (B — класс прочности на сжатие)

Расчетные сопротивления для арматуры для предельных состояний второй группы $R_{s,ser}$ вводят в расчет при $\gamma_s = 1$.

Глава 3 ГИДРОУЗЛЫ МЕЛИОРАТИВНОГО НАЗНАЧЕНИЯ

3.1. КЛАССИФИКАЦИЯ. ОБЩИЕ ПРИНЦИПЫ КОМПОНОВКИ

Гидроузел — совокупность гидротехнических сооружений, объединенных своим местоположением и совместным назначением. **Водозаборный гидроузел** — комплекс гидротехнических сооружений, обеспечивающих забор воды из водоемов и водотоков для различных хозяйственных нужд — орошения земель, энергетики, водоснабжения и других целей. Как правило, гидроузлы имеют комплексное назначение, обеспечивая требования различных отраслей народного хозяйства.

Основная расчетная характеристика водозаборных гидроузлов — коэффициент водозабора $k_в = Q_в/Q$, где $Q_в$ — расход, забираемый с помощью водозаборного сооружения, Q — расход реки в ВБ. Водозаборные узлы оросительных систем обычно располагают в голове системы. Они должны: четко выполнять график водоподачи; предохранять магистральный канал (водовод) от попадания в него донных наносов, льда, шуги, плавающих тел; беспрепятственно пропускать паводковые и ливневые расходы, в том числе и внезапные; прекращать поступление воды в водоводы в случаях, предусмотренных правилами эксплуатации, и при техническом осмотре; обеспечивать рыбоохранные и природоохранные мероприятия.

Класс гидроузлов определяют в соответствии с СНиП 2.06.01.86 (см. табл. 1.2).

По виду используемого *водоисточника* мелиоративные гидроузлы делят на речные и водохранилищные (озерные), а *по способу забора воды* — на бесплотинные и плотинные.

По способу подачи воды в систему различают самотечный водозабор и машинный водоподъем. Последний осуществляют с помощью НС: стационарных, плавучих и передвижных (см. гл. 9).

Состав *основных сооружений водозаборного гидроузла* зависит от типа водозабора, способа подачи воды в систему, гидрологического и руслового режимов реки и прочих местных условий. В общем случае в состав гидроузла входят: руслорегулирующие дамбы в ВБ и НБ, глухая и водосбросная плотины (при плотинном водозаборе), водозаборные сооружения (водоприемники), наносоперехватывающие, промывные и шугосбросные устройства, решетки для задержания мусора, а если необходимо, то и отстойники для очистки воды от донных наносов. На реках, имеющих рыбохозяйственное значение, предусматривают рыбопропускные и рыбозащитные сооружения. В состав сооружений гидроузла комплексного назначения могут входить судоходные, энергетические, лесопропускные и другие сооружения. Правила их проектирования и расчета в данном справочнике не рассматриваются.

Компоновка гидроузлов, то есть взаимное расположение их основных и второстепенных сооружений, должна обеспечивать условия совместной работы этих сооружений, наиболее полно удовлетворяющие народнохозяйственным и техническим требованиям. Основа выбора рациональной компоновки — технико-экономическое сравнение возможных вариантов. Предпочтение отдают варианту, в котором наиболее полно соблюдены требования охраны окружающей среды и обеспечены при прочих равных условиях и наилучших технико-экономических показателях надежность эксплуатации основных сооружений, удобство монтажа и ремонта оборудования, экономия материальных ресурсов, перспективы развития орошения.

Компоновки сооружений гидроузлов I и II классов следует обосновывать данными лабораторных исследований. Для гидроузлов III и IV классов такие исследования проводят лишь в случае применения новых, не испытанных в эксплуатации схем.

При разработке компоновок следует рассматривать возможность и техническую целесообразность совмещения сооружений для одновременного выполнения ряда эксплуатационных функций; возведения сооружений и ввода их в эксплуатацию по очереди; подачи воды в оросительные системы, выработки энергии, пропуска судов и рыбы уже в период строительства.

Топографические и геологические условия на участке размещения створа гидроузла должны обеспечивать минимальную длину фронта напорных сооружений; отсутствие значительных подтоплений и затоплений территорий; возможность размещения жилого поселка и основных подсобных предприятий, а также создания сети дорог; благоприятное геологическое строение оснований сооружений; сохранение ландшафта и природных условий произрастания естественной растительности в зоне строительства гидроузла.

При строительстве гидроузлов необходимо предусмотреть: концентрацию бетонного хозяйства, минимальное число пересечений бетонных сооружений с грунтовыми, компактное размещение сооружений однотипных по материалу возведения; условия для выполнения работ по укреплению оснований; беспрепятственный пропуск строительных расходов; возможность возведения гидроузла в кратчайшие сроки; максимальное сбалансирование объемов выемок и насыпей и сокращение объемов карьеров, резервов, отвалов и т. д.

Для бесперебойной эксплуатации при компоновке гидроузла следует стремиться к наиболее благоприятному режиму работы всех сооружений; возможности ввода их в эксплуатацию очередями; созданию благоприятного гидравлического режима в обоих бьефах, особенно в период пропуска паводков и льда; минимальному пропуску донных наносов в мелиоративные системы. Плановая картина течения должна по возможности исключать значительные переформирования берегов и дна русла, а также обеспечивать отсутствие возникновения опасных сбойных течений при несимметричных открытиях отверстий водопропускных сооружений.

3.2. РЕЧНЫЕ ВОДОЗАБОРНЫЕ ГИДРОУЗЛЫ

3.2.1. ОСНОВНЫЕ ТИПЫ. РАСЧЕТНЫЕ РАСХОДЫ

Речной водозаборный гидроузел — комплекс гидротехнических сооружений, обеспечивающих гарантированный водозабор из реки без регулирования ее стока. ВБ речных гидроузлов обладают, как правило, значительно меньшими емкостью и диапазоном колебаний уровней воды (0,5...2 м), чем у водохранилищных узлов. Их принято называть подпертыми бьефами. В ВБ гидроузлов обычно задерживают донные наносы, при необходимости осаждения взвешенных наносов в состав гидроузла включают отстойники (см. 3.5); гидроциклонные осветлители при водозаборе в закрытые оросительные системы с подачей к дождевальным машинам и др.

Речные водозаборные гидроузлы делят на два типа — плотинные и бесплотинные. Конструкцию водозабора выбирают в зависимости от уровней и характера течения воды в реке. При гидротехнической классификации по морфологическим признакам выделяют горные, предгорные и равнинные участки рек (табл. 3.1).

Бесплотинный речной водозабор устраивают в благоприятных топографических, гидрологических и инженерно-геологических условиях при обеспечении командования уровней воды в реке над уровнем магистрального канала (водовода) при максимальном водоотборе. Для рек с обильными донными наносами (более 1 кг/м³) в легкоразмываемых аллювиальных руслах допускается строительство бесплотинного водозабора при коэффициенте водозабора более 0,2. Бесплотинный гидроузел отличается простотой конструкции и невысокой относительной стоимостью строительства. Недостатки — низкое качество очистки воды от наносов, распластанная компоновка, дорогая эксплуатация из-за больших объемов механической очистки.

3.1. Характеристика основных участков рек

Участок реки, уклон	Донные наносы	Зимний режим	Особые условия
Горный $i>0{,}05$	Валунно-галечниковые гравелистые (более 50 мм)	На мелких реках возможно промерзание до дна. На больших и средних — шуга, забереги	Возможно временное прекращение поверхностного стока. Ливневые и селевые потоки
Предгорный $i=0{,}05...0{,}001$	Гравелисто-галечниково-песчаные (1...30 мм)	Шуга, забереги. Возможен ледостав	Широкая гравелисто-галечниковая пойма, неустойчивость потока
Равнинный $i<0{,}001$	Мелкопесчаные и пылеватые (менее 1 мм)	Шуга, длительный ледостав, интенсивный ледоход с заторами	Меандрирующее, легко размываемое русло

Плотинные водозаборные узлы устраивают, когда бытовые уровни реки недостаточны для самотечной подачи воды в каналы. При этом сокращается холостой самотечный участок магистрального канала; повышается качество забираемой воды; уменьшается влияние водоотбора на режим реки, особенно при больших коэффициентах водозабора и двухстороннем отборе воды, а также и на условия судоходства в районе гидроузла.

Ориентировочно выбрать тот или иной тип плотинного водозаборного узла в зависимости от участка реки, условий подачи воды в каналы и осо-

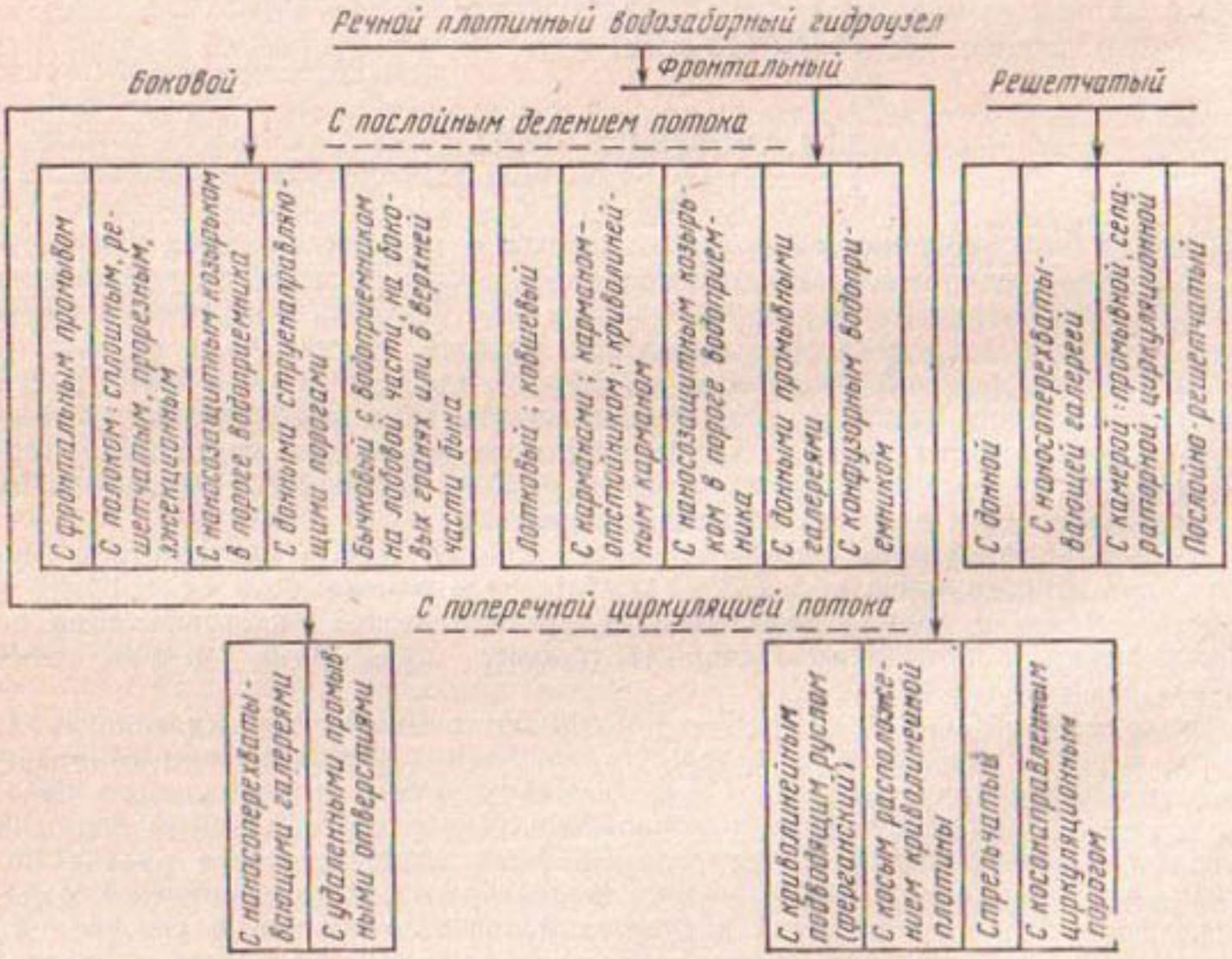


Рис. 3.1. Основные типы плотинных водозаборных гидроузлов и их модификации

3.2. Рекомендуемые типы водозаборного гидроузла для основных участков реки

Типы водозаборного узла	Область применения	Подводящее русло	Коэффициент водозабора, расход	Особые условия
Боковой:				
с фронтальным промывом наносов	Предгорные и равнинные участки рек, реже — горные. Одно- и двухсторонняя подача воды	Криволинейное при одностороннем водозаборе, прямолинейное при двухстороннем водозаборе	$k_c<0,5$; расходы без ограничений; расход одного водоприемника до 5 м³/с	При $k_c>0,5$ необходима аккумуляция донных наносов и периодический промыв. Неселеносные участки рек, отсутствие плавника
с полоком				
с наносоперехватывающими галереями				
с удаленными промывными отверстиями бычковый				
Фронтальный:				
с карманами	Преимущественно равнинные, допускаются предгорные участки рек. Как правило, двухсторонняя подача воды	Прямолинейное	$k_c<0,7$; расходы без ограничений	Не рекомендуется для рек с большим количеством карчей и плавника
двухъярусный				
с отстойником				
с наносоперехватывающими галереями				
Ферганский	Предгорные участки с односторонней подачей воды	Криволинейное	$k_c<0,8$; расходы без ограничений	Допускается переброска части расхода воды (до 30%) на другой берег
Донно-решетчатый:	Участки рек:			
тирольский	горные	Прямолинейное	$k_c<0,4$; расход до 20 м³/с	Максимальный расчетный расход реки до 300 м³/с
с наклонной решеткой	горные селеносные	Криволинейное		
с косонаправленным порогом или наносоперехватывающей траншеей	горные неселеносные	То же	$k_c<0,7$; расход до 20 м³/с	
послойно-решетчатый	То же	Прямолинейное	$k_c<0,4$; расход до 20 м³/с	То же и отсутствие обильного плавника

бенностей природных условий можно по таблице 3.2. При соответствующем обосновании могут быть выбраны другие типы водозаборных гидроузлов (рис. 3.1).

При проектировании бесплотинных водозаборов за расчетный принимают бытовой уровень при прохождении расчетных расходов (максимального, минимального и критического) с учетом динамики руслового процесса, а плотинных — исходят из максимальных расчетных расходов в реке, определяемых в зависимости от класса сооружений по таблице 1.3.

3.2.2. ПЛОТИННЫЕ ВОДОЗАБОРНЫЕ ГИДРОУЗЛЫ

Плотинный водозаборный гидроузел — комплекс гидротехнических сооружений, включающий водоподпорное сооружение и обеспечивающий подачу воды в оросительные системы без создания водохранилища. Относится к низконапорным гидроузлам (напор до 10 м).

Состав сооружений плотинного водозабора: водоприемник, водосбросная плотина и конструктивные элементы для защиты водоприемника от захвата донных наносов. Назначение последних — разделение осветленных и насыщенных наносами слоев воды: первые отклоняются к водоприемнику, а вторые отводятся и сбрасываются в НБ. Для трансформации гидравлической структуры потока используют послойный отвод воды; естественную и искусственную поперечную циркуляцию на криволинейных участках реки; реактивные донные токи, возбуждаемые искусственными преградами и экранами и пр.

Включение отстойников в состав плотинного гидроузла требует специального обоснования.

Основные типы плотинных водозаборных узлов по гидравлической структуре потока, определяющей характер деления наносов между руслом реки и водоприемником, и их модификации приведены на рисунке 3.1, а область применения — в таблице 3.2.

Боковой водозаборный гидроузел (табл. 3.3) характеризуется водоотбором из источников под углом к оси потока. Головное сооружение (водоприемник или регулятор) обычно располагают на берегу реки рядом с плотиной или в конце криволинейного подводящего канала, трассируемого в обход плотины. Регулятор преимущественно открытого или диафрагменного типа. Угол отвода не превышает 130...140°. Наносы промывают через отверстия или промывные каналы в плотине, береговые донные промывники и устройства, отверстия в быках и др.

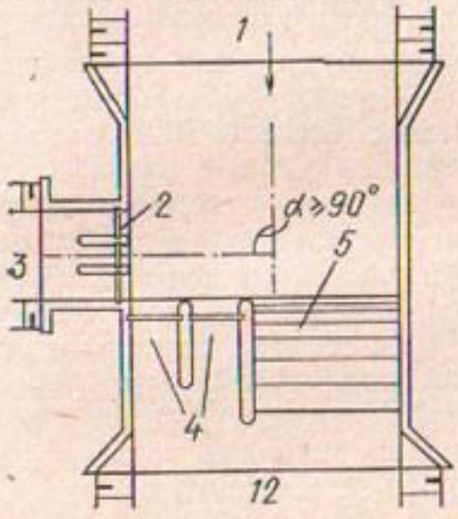
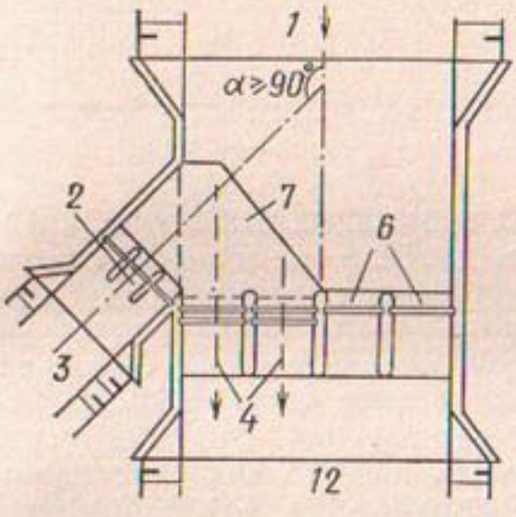
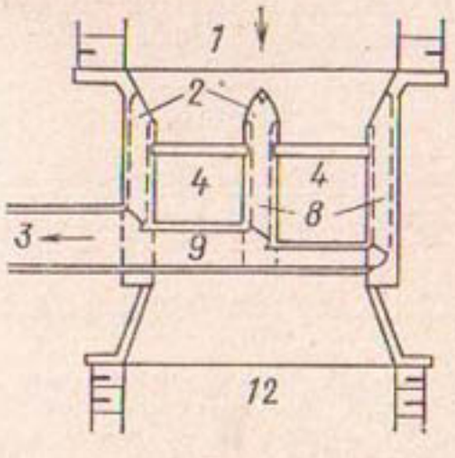
Достоинство боковых водозаборов — простота конструкции и эксплуатации, благодаря чему они находят широкое применение в мелиоративном строительстве. Недостаток простейших схем — пропуск значительного количества донных наносов в магистральные каналы.

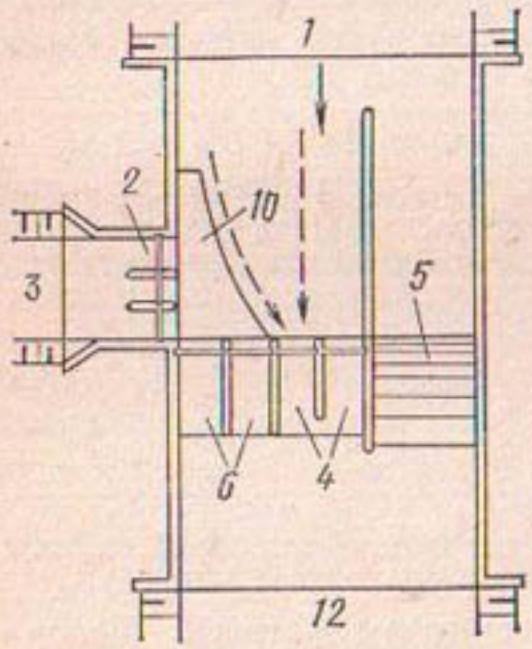
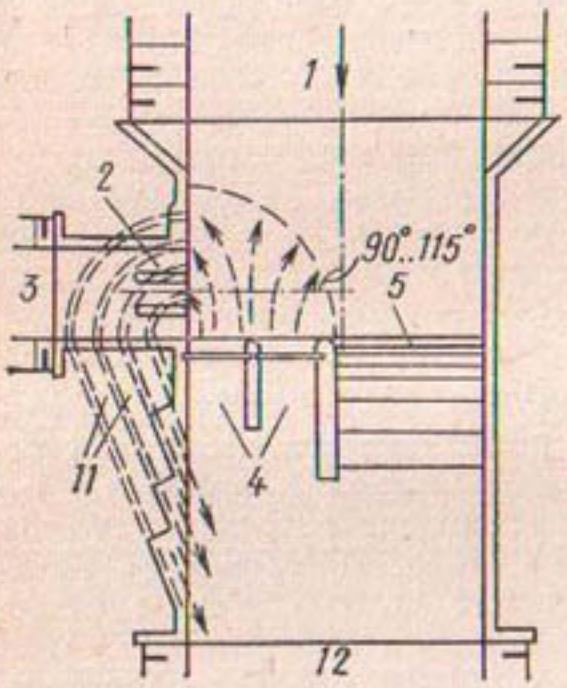
Фронтальный водозаборный гидроузел (табл. 3.4) — гидроузел, в котором забор воды происходит по направлению основного потока реки. Фронт водоприемника обычно совпадает с фронтом плотины. Особенностью такого узла является поверхностный водоотбор из верхних очищенных от донных наносов слоев речного потока и донный промыв наносов транзитом по реке. По условиям гидравлического промыва наносов фронтальный гидроузел может быть с фронтальным и боковым промывом.

Решетчатый плотинный водозаборный гидроузел забирает воду с определенной глубины или со дна реки через решетку на входе в водоприемник. Компоновка этих гидроузлов наиболее приспособлена к особенностям горных рек — большое количество донных наносов, внезапность паводков, селевые явления.

По гидравлическим условиям работы решетчатые водозаборы делят на две группы: с донным водоотбором и водоотводом (донно-решетчатые); с поверхностным водоотбором и донным водоотводом (послойно-решетчатые, с решетками на повышенных отметках и т. д.). Используют их как для од-

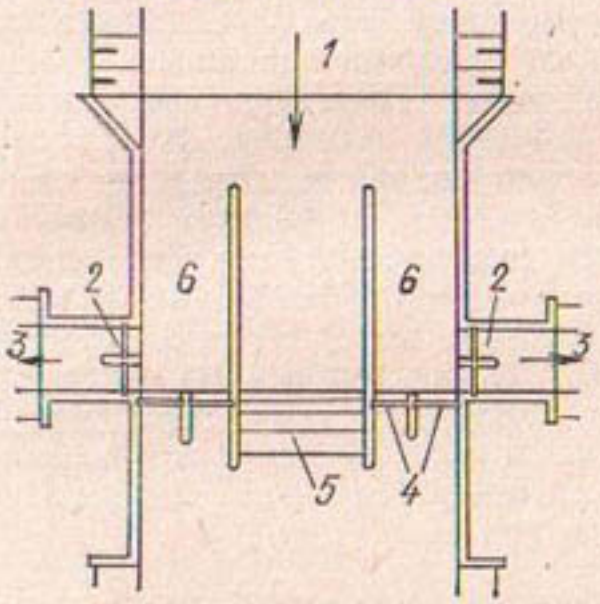
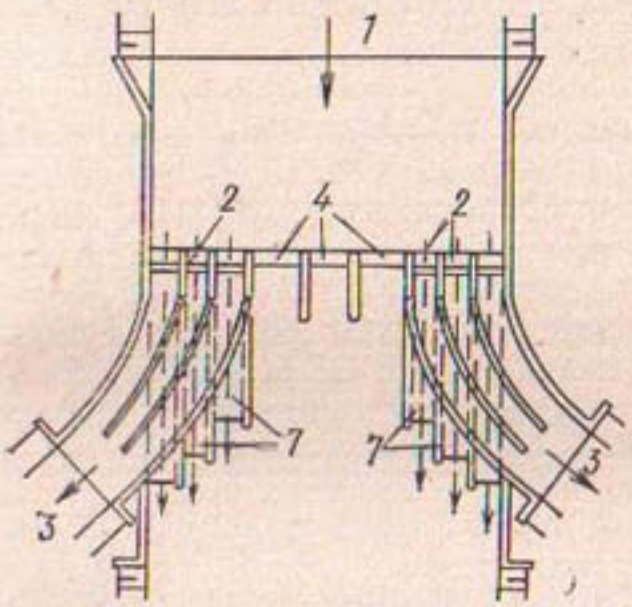
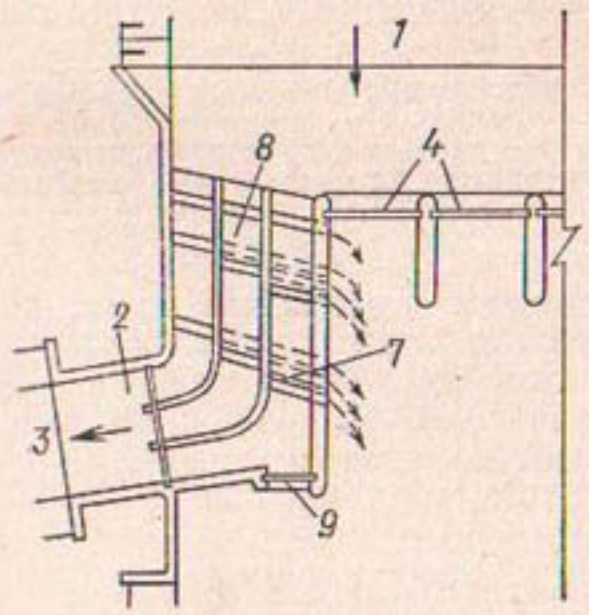
3.3. Типы боковых плотинных гидроузлов

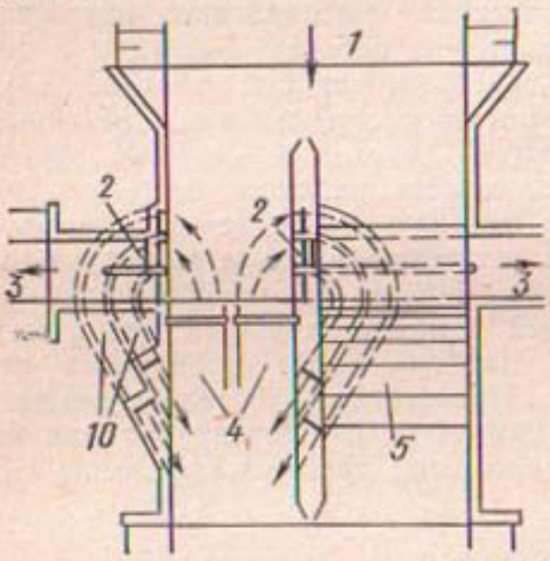
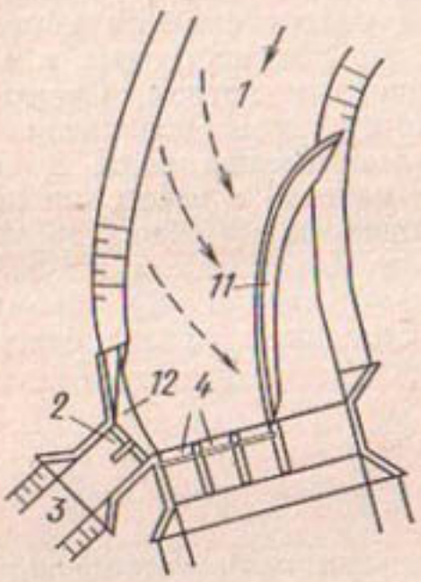
Тип и схема	Конструктивные особенности
С фронтальным промывом 	Водоприемник по типу шлюза-регулятора с входным порогом; плотина с промывными отверстиями для смыва наносов, накопившихся в ВБ, и водосливом практического профиля для пропуска паводка. Невозможен полный промыв ВБ
С горизонтальным полоком 	Перед водоприемником устроен полок — горизонтальная плита на отметке входа шлюза-регулятора. Полок опирается на быки промывных отверстий и делит водный поток по глубине на два слоя. Донные наносы с избытком воды сбрасывают в НБ под полоком. Варианты — решетчатый, прорезной полоки. Возможны засорение и завал наносами пространства под плитой
Бычковый 	Односторонние или двухсторонние водоприемники с решетками размещены в береговых устоях и быках плотины на отметках, обеспечивающих забор только верхних слоев потока. Нижние слои с наносами пропускают через сбросные отверстия плотины. Варианты — совмещенный с горизонтальными водоприемными отверстиями; с вертикальными промывными отверстиями и промывной галереей. Не применяют на реках селеносных и транспортирующих плавник, забивающий решетки

Тип и схема	Конструктивные особенности
С удаленными промывными отверстиями 	Прилегающая к водоприемнику часть водосбросной плотины имеет повышенный порог (более эффективен криволинейный), что приводит к перераспределению расходов воды в створе плотины и возникновению поперечной циркуляции водного потока. Через промывные отверстия второй части плотины, расположенные на уровне понура, сбрасывают донные наносы. Третья часть плотины — водосливная. Требует больших сбросных расходов для поддержания интенсивной поперечной циркуляции; значительных размеров регулятора из-за относительно малых напоров перед ним; затруднена борьба с плавником
С наносоперехватывающими галереями 	При закрытых промывных отверстиях крайних пролетов плотины в водном потоке образуется устойчивая циркуляция, при которой донные токи направляются к входу наносоперехватывающих галерей, располагаемому в зоне встречи гряды наносов с обратным донным течением. Вынос одной из галерей перед водоприемником способствует поступлению в нее основной массы наносов. Широко применяют в гидротехническом строительстве, хотя они и требуют периодических промывок ВБ через отверстия плотины, примыкающие к водоприемнику, и отключения водозабора на этот период

Примечание. *1* — подводящий канал; *2* — водоприемник; *3* — магистральный канал; *4* — промывные отверстия; *5* — автоматический водослив; *6* — сбросные отверстия; *7* — горизонтальный полок; *8* — водопроводящие галереи; *9* — лоток; *10* — криволинейный порог; *11* — наносоперехватывающие галереи; *12* — отводящее русло.

3.4. Типы фронтальных плотинных гидроузлов

Тип и схема	Конструктивные особенности
С фронтальным промывом наносов: с карманами (индийский) 	Водоприемники располагают, как правило, по обоим берегам. Карманы в составе перегораживающей плотины служат речными отстойниками, в которых осаждаются донные и крупные фракции взвешенных наносов. Аккумуляция наносов обеспечивается закрытием промывных отверстий в конце карманов-отстойников. После заполнения аккумулирующей емкости кармана проводят промыв наносов через промывные отверстия. Недостатки — плохая промываемость карманов, отключение канала на период промыва; тяжелое крепление НБ
двухъярусный 	Расслоения потока воды достигают горизонтальной плитой. Нижние слои с донными наносами через промывные галереи под водоприемником сбрасывают в НБ, верхние поступают в канал по криволинейным лоткам. Существует много конструктивных вариантов. Недостатки — взмучивание воды и завлечение части наносов в канал, сложность конструктивного исполнения, засорение галерей донным плавником и эксплуатационные затруднения по промывам ВБ ввиду суженного фронта отверстий плотины
С боковым промывом наносов: с донными промывными галереями 	Перед водоприемником устраивают многокамерный отстойник с промывными галереями: через галерею на входе наносы непрерывно сбрасывают в НБ, галереи в камере служат для периодической промывки камер отстойника при непрерывной подаче воды в магистральный канал. Недостаток — уменьшение фронта промывных отверстий плотины, непроизводительные сбросы воды

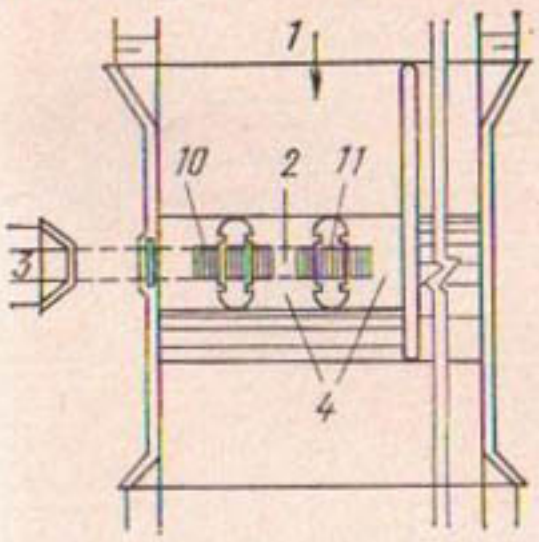
Тип и схема	Конструктивные особенности
С наносоперехватывающими галереями 	Перед водосливной плотиной устраивают карман, примыкающий к одному из берегов. При закрытых затворах плотины возникают обратные донные токи и мощное винтовое движение с пониженной зоной давления при встрече его с основным течением. В этой зоне располагают входные отверстия наносоперехватывающих галерей ниже отверстий водоприемника. Осветленную воду подают на оба берега шлюзом-регулятором и дюкером (или двумя дюкерами). Через промывные отверстия плотин осуществляют периодические промывы отложений наносов в кармане. Не рекомендуется для селеопасных участков рек
С криволинейным подводящим руслом (ферганский) 	Водоприемник на вогнутом берегу, куда верхние осветленные слои воды отклоняются поперечной циркуляцией, генерируемой криволинейным подводящим руслом. Нижние слои с донными наносами направляются к выпуклому берегу и сбрасываются в НБ через промывные отверстия в плотине. Водозабор односторонний, на другой берег воду можно подавать дюкером. Сокращение водосливного фронта плотины компенсируется криволинейным автоматическим водосливом, выдвинутым в ВБ. Варианты — вертикальный или Г-образный порог перед водоприемником. Недостатки — плохая промываемость узкого и криволинейного ВБ; неудовлетворительная гидравлика сброса воды через плотину. Получил большое распространение благодаря простоте конструкции и надежности эксплуатации

Примечание. *1* — подводящее русло; *2* — водоприемник; *3* — магистральный канал; *4* — промывные отверстия; *5* — автоматический водослив; *6* — карман-отстойник; *7* — промывные галереи; *8* — многокамерный отстойник; *9* — открытое промывное отверстие; *10* — наносоперехватывающие галереи; *11* — криволинейный автоматический водослив; *12* — криволинейный порог.

носторонней, так и для двухсторонней водоподачи. Простейшая схема донно-решетчатых водозаборов — донная галерея по всей ширине водотока, перекрытая сверху решеткой (тирольский водозабор). Из-за сильной засоряемости решетки в настоящее время такие водозаборы применяют редко. Ряд конструктивных типов решетчатых водозаборов приведен в таблице 3.5.

Общий недостаток водозаборных узлов этого типа — пропуск наносов в водоприемники, что требует устройства отстойников в большинстве схем; забивка решеток мусором и неблагоприятные условия промыва ВБ.

3.5. Типы решетчатых водозаборных узлов

Тип и схема	Конструктивные особенности
С донным водоотбором и водоотводом донно-решетчатый	Донная галерея водосливной плотины, перекрытая решеткой, размещаемая по всему водосливному фронту или части его. Крупные наносы задерживаются решеткой, мелкие фракции пропускаются в канал, где устраивают отстойники, промывные камеры и др. Варианты: с наносоперехватывающей траншеей перед водозаборной галереей; с промывным отверстием на отметке дна реки (см. рис.); с наклонной решеткой водоприемника; с криволинейным порогом перед решеткой, отклоняющим наносы к промывному отверстию плотины
С поверхностным водоотбором и донным водоотводом с косонаправленным ступенчатым циркуляционным порогом (КЦП)	Общая поперечная циркуляция водного потока, генерируемая криволинейным подводящим руслом, усиливается устройством КЦП, который отклоняет донные струи в сторону реки и направляет их в промывник в теле быка для сброса в НБ. Водоприемная галерея, расположенная на один-два метра выше сбросного отверстия плотин, принимает воду, переливающуюся через КЦП
Послойно-решетчатый 	Над водоприемной галереей, устроенной в теле плотины, размещают небольшие полые быки. При их обтекании в потоке возникает обратное донное течение, при встрече которого с основным потоком на некотором расстоянии от преграды образуется вращательное движение донных слоев с наносами, приостанавливающее их и направляющее в обход преграды. В результате у самой преграды образуется полоса осветленной воды, поступающей в галерею. Насыщенные наносами слои воды сбрасываются в НБ через промежутки между быками. При повышенных уровнях вода забирается и через решетки в затапливаемых быках

Примечание. *1* — подводящее русло; *2* — водозаборная галерея; *3* — магистральный канал; *4* — промывные отверстия; *5* — автоматический водослив; *6* — наносоперехватывающая плотина; *7* — криволинейный порог; *8* — зимний водоприемник; *9* — косонаправленный ступенчатый порог; *10, 11* — решетки нижнего и верхнего ярусов.

3.2.3. БЕСПЛОТИННЫЕ ВОДОЗАБОРНЫЕ ГИДРОУЗЛЫ

В бесплотинном водозаборном гидроузле (табл. 3.6) технологические операции процесса водозабора из реки осуществляют при бытовых уровнях. Устраивают их, когда уровни воды в реке обеспечивают командование над уровнем магистрального канала (водовода).

По способу подачи воды бесплотинные гидроузлы могут быть самотечными или с машинным водоподъемом, а *по форме управления водой*, подаваемой в магистральный канал, — нерегулируемые и регулируемые. При нерегулируемом водозаборе уровни воды в магистральных каналах изменяются синхронно с уровнями воды в реке. При регулируемом водозаборе используют регуляторы, обеспечивающие водоподачу в соответствии с графиком водопотребления независимо от изменения уровней воды в реке.

Бесплотинные водозаборные узлы нашли широкое применение благодаря простоте их конструкции и относительно невысокой стоимости строительства. В то же время компоновка их распластана, эксплуатация дорога, и качество забираемой воды в отношении содержания наносов низко.

Для повышения эффективности борьбы с донными наносами коэффициент водозабора ограничивают до 0,2; водозабор размещают на вогнутом берегу, где возникает поперечная циркуляция; создают искусственную поперечную циркуляцию с помощью струенаправляющих систем; обеспечивают водоотбор из верхних, менее насыщенных слоев потока путем регулирования отметки порога, наибольшего отклонения донных слоев от водозабора и других мероприятий.

3.2.4. ОСОБЕННОСТИ РАСЧЕТА

Зарегулированное русло реки, обеспечивающее в бьефах гидроузла требуемую гидравлическую структуру потока, благоприятный режим наносов и предупреждающее опасные переформирования в ВБ, имеет в плане прямолинейную или криволинейную форму, в НБ прямолинейную. Устойчивая ширина B_{st} в ВБ для прямолинейного русла с уклоном i:

$$i < 0{,}01 \quad B_{st} = \sqrt{Q_f}/(\sqrt{v_{adm}}\, i^{0,2}); \qquad (3.1)$$

$$i \geqslant 0{,}01 \quad B_{st} = (2{,}6/i^{0,2})\,(Q_f/\sqrt{g})^{0,4},$$

где Q_f — руслоформирующий расход реки 5...10%-ной обеспеченности; v_{adm} — неразмывающая скорость для русловых отложений.

Для криволинейного русла устойчивая ширина равна 0,8 B_{st}. Углы и радиусы закруглений зарегулированного русла даны на рисунке 3.2. Зарегулированное русло в НБ устраивают прямолинейным на длине (1...2) B_{st}.

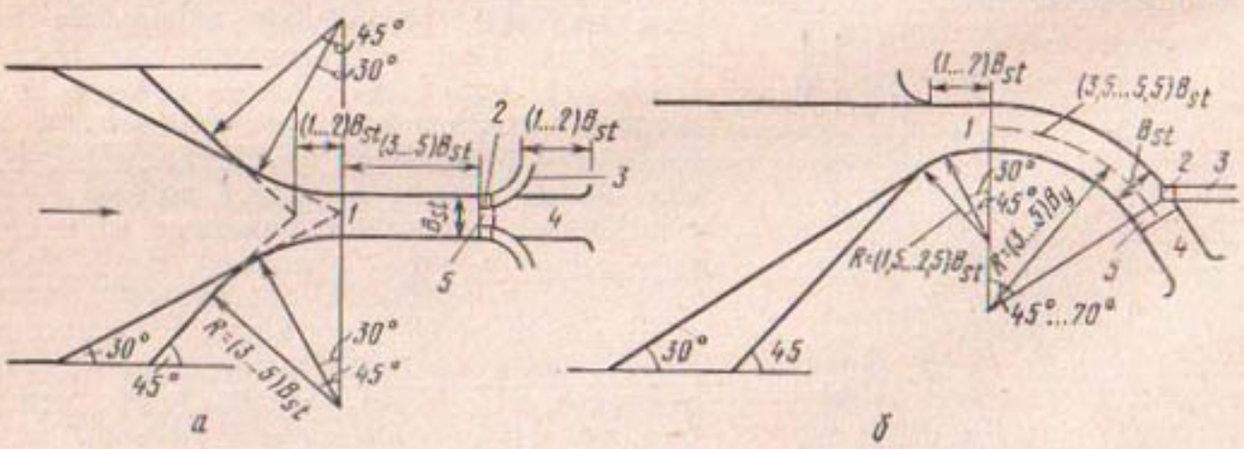
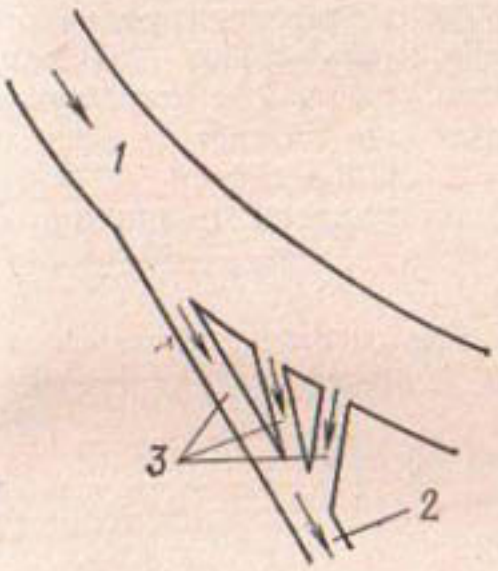
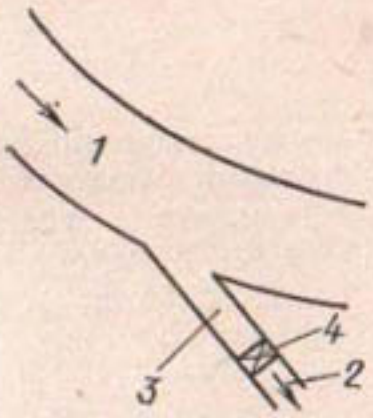
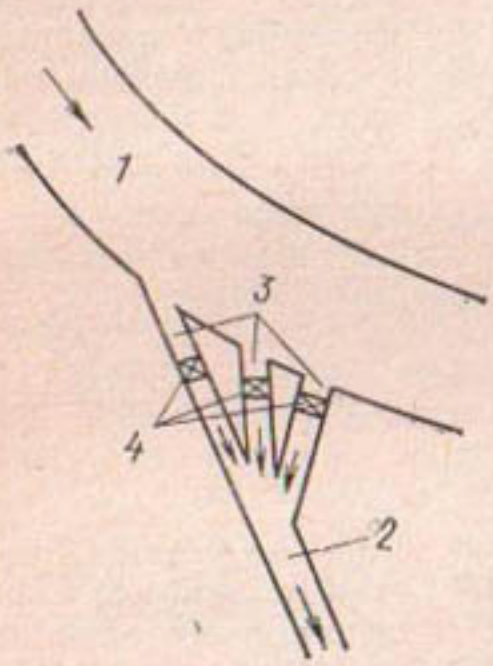
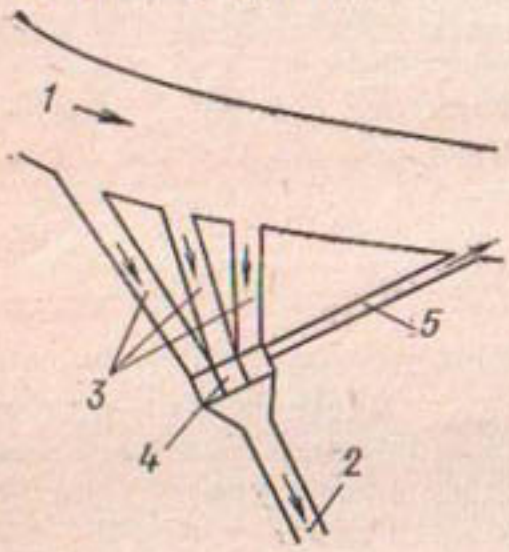
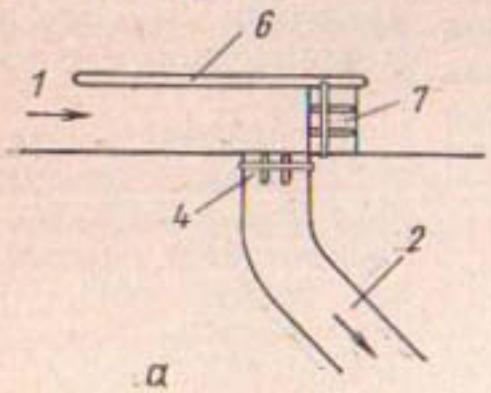
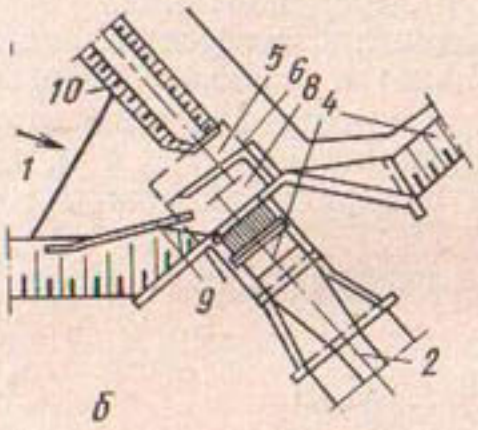


Рис. 3.2. Схемы регулирования русла у речного водозаборного сооружения: *а, б* — прямолинейное и криволинейное подводящее русло; *1* — подводящее русло; *2* — водоприемник; *3* — магистральный канал; *4* — отводящее русло; *5* — водоподпорная плотина

3.6. Основные типы бесплотинных водозаборных узлов

Тип и схема	Особенности	Достоинства и недостатки
С боковым водозабором: одноголовый нерегулируемый	Открытый канал, отходящий от реки под некоторым углом к ее оси. Чаще всего используют как временный водозабор	Простота исполнения. Быстрое занесение наносами, непрерывное изменение плановых очертаний головы канала, нерегулируемость забираемого расхода
многоголовый нерегулируемый 	Несколько подводящих каналов-прокопов, используемых и в качестве отстойников. Позволяет регулировать водозабор при колебаниях уровней воды в реке, рассредоточить очистку каналов, использовать площадь между прокопами для размещения отвалов наносов, извлекаемых при очистке	Большие объемы очистки от наносов; смещение голов каналов на реках с неустойчивыми руслами, требующее берегоукрепительных и регулировочных работ
одноголовый регулируемый 	В голове бокового отвода или на некотором удалении устраивают шлюз-регулятор. Первую схему используют при неразмываемых берегах, вторую — при размываемых. Канал-прокоп при этом служит отстойником с периодической очисткой. Пропускная способность регулятора определяется режимом реки	Достоинства регулируемых водозаборов: обеспечение непрерывной подачи осветленной воды, гидравлический промыв наносов без нарушения водоподачи; малая потребность в средствах очистки и равномерность их загрузки. Недостатки: затрудненный промыв прокопов в паводковый период; занесение тракта наносами при пропуске малых расходов; сложность размещения отвалов наносов

Тип и схема	Особенности	Достоинства и недостатки
многоголовый регулируемый 	На реках с неустойчивым руслом и большим содержанием наносов устраивают два—четыре прокопа-отстойника длиной по 2...2,5 км с решений (с централизованным каналe или один общего (с централизованным управлением). Обеспечивает более надежный водозабор и дифференцированное регулирование водоподачи	То же
многоголовый с двухъярусным шлюзом-регулятором 	Верхний ярус используют как водоприемник, нижний — как промывные галереи с отводом в промывной канал	Дифференцированно регулируют расход воды, поступающей из каждого канала. Облегчается промыв наносов в прокопах
С фронтальным водозабором (шпорный)  а	Для увеличения ширины захвата воды устраивают дамбу из местных материалов — шпору, часто с промывным отверстием. Устраивают с регуляторами и без них. Для усиления отклонения донных наносов устанавливают направляющие донные пороги, лотки или поверхностные струенаправляющие системы. Целесообразны на реках с неустойчивым	Более высокий коэффициент водозабора. Улучшают условия борьбы с наносами и командования; увеличивают надежность водозабора. Нельзя применять при низких бытовых уровнях, недостаточных для самотечного водозабора; водоотвода из реки более 15...20% меженного расхода; при значительном

Тип и схема	Особенности	Достоинства и недостатки
 *б*	руслом, резким падением уровней в реке при прохождении небольших расходов	уменьшении захвата донных наносов; опасен подмыв шпор

Примечание. *1* — подводящее русло; *2* — магистральный канал; *3* — канал-прокоп; *4* — шлюз-регулятор; *5* — промывной канал; *6* — продольная дамба-шпора; *7* — промывные отверстия; *8* — карман; *9* — циркуляционный порог; *10* — регуляционная шпора.

Водоприемники гидроузла рассчитывают на пропуск форсированного расхода магистрального канала. При напорах до 5 м рекомендуют открытые водовыпуски, при больших расходах (или для защиты водоприемника от сора, шуги, льда) — трубчатый или диафрагмовый водовыпуск. Бычковые и донные водоприемники применяют при специальных типах водозабора. Отметку НПУ определяют исходя из гидравлических потерь в водоприемнике h_w и максимальной глубины воды в магистральном канале h_{max}:

$$\nabla НПУ = \nabla \text{ дна} + h_{max} + \Sigma h_w. \qquad (3.2)$$

Ширину фронта водосбросной плотины назначают в пределах ширины зарегулированного подводящего русла при стандартных размерах отверстий. Отметку ФПУ определяют по действующему напору на водосбросных отверстиях плотины при пропуске через нее паводкового расхода расчетной обеспеченности. Разница между отметками ФПУ и НПУ не должна превышать 1,5 . . . 2 м.

Водобой низкопороговых плотин при влечении рекой крупных наносов заглубляют в нижнем бьефе до отметки предполагаемого размыва. Глубину воронки размыва для узлов на горных и предгорных участках рек находят по формуле

$$t = \frac{1,6\,(d_m/d_{max})^{0,25} q^{0,75} \Delta h^{0,375} \delta}{g^{0,375} d_{m,k}}, \qquad (3.3)$$

где d_m, d_{max} — соответственно средний и максимальный диаметры наносов; q — удельный расход воды; Δh — разница уровней верхнего и нижнего бьефов с учетом скорости подхода; $d_{m,k}$ — средний диаметр камня, слагающего наброску в воронке; δ — коэффициент, учитывающий толщину слоя наброски t_k, $\delta = 1,15(\Delta h/t_k)^{0,2}$; g — ускорение свободного падения.

Расчеты сопряжения бьефов приведены в гл. 5.

Наносоперехватывающие галереи имеют размеры: $h_{gal} = 0,25 \ldots 0,33\,h$ ВБ при НПУ; $b_{gal} = b$, где b — ширина пролета водоприемника. Скорость воды в галереях должна быть не менее транспортирующей наносы максимальной крупности d_{max}

$$v = 3\sqrt{g d_{max}}. \qquad (3.4)$$

Расход воды в наносоперехватывающей галерее вычисляют по формуле

$$Q_{gal} = A_{gal}\sqrt{2q\Delta h}/\sqrt{\Sigma\xi_i}, \qquad (3.5)$$

где A_{gal} — площадь сечения галереи; Δh — перепад давлений в бьефах; $\Sigma\xi_l$ — сумма коэффициентов гидравлических сопротивлений, определяемая по гидравлическим справочникам.

Приведенные выше рекомендации справедливы для любого типа водозаборного узла.

В *боковом водозаборе* (см. табл. 3.3) высоту входного порога принимают $0{,}5 \ldots 0{,}25\,H$, но не менее 1,5 м, где H — напор перед плотиной.

Для *бычкового водозабора* площадь входного отверстия $A_{ent} = Q_c/(nv_{ent})$, где Q_c — расход магистрального канала; n — число отверстий; v_{ent} — скорость воды на входе, обычно 0,5 ... 1 м/с; высота входного отверстия 1,5 ... 2 м. Параметры водопроводящей галереи: ширина 3 ... 4 м, скорость воды 1,5 ... 2,5 м/с. Лоток рассчитывают на равномерный режим течения воды при скорости 1,5 ... 2 м/с.

Потери напора на входных решетках Δh_e и на поворотах определяют по формулам

$$\Delta h_l = 0{,}318p^{1{,}6}\,(2{,}3l/a + 2{,}4a/l + 8)\,v^2_{ent}/g; \qquad (3.6)$$

$$\Delta h_r = (2{,}23b_{gal}v^2_{gal}\sin\alpha)/2gr, \qquad (3.7)$$

где p — относительный просвет решетки, $p = a/(a+t)$ (t — толщина стержня решетки, $t = 8 \ldots 10$ мм); a — просвет решетки, $a = 10 \ldots 200$ мм; l — ширина стержня решетки $l = 40 \ldots 70$ мм; α — угол поворота; r — радиус поворота.

Для водозаборного сооружения без промывных отверстий порог перед водоприемником имеет высоту $0{,}5 \ldots 0{,}6\,H$ с радиусом закругления $R = 0{,}8 \ldots 1\,B$, где B — ширина фронта плотины без учета автоматического водослива. Общую ширину промывных b_w и сбросных b_t отверстий плотины принимают соответственно $b_w = 0{,}3 \ldots 0{,}4\,B$, $b_t = 1{,}5 \ldots 2{,}5\,b_w$.

В *фронтальных водозаборах* (см. табл. 3.4) высота порога водоприемников зависит от высоты промывных галерей и составляет $^1/_3 \ldots {}^1/_2 h_{ВБ}$ при НПУ. Для водозаборного сооружения с карманами размер карманов-отстойников назначают из условия обеспечения в них скорости 0,4 ... 0,6 м/с. Для водозабора с наносоперехватывающими сооружениями ширина кармана $b = 0{,}8 \ldots 1{,}2(B_{пр} + B_{лев})$, где $B_{пр}$ и $B_{лев}$ — ширина отверстий правого и левого водоприемника. Рекомендуемая средняя скорость воды в кармане $v_m = 0{,}8 \ldots 0{,}9v$, где v — средняя скорость воды в реке.

При двухъярусном водозаборе ширина пролетов плотины уменьшается за счет размещения водоприемников. Промывные галереи проверяют на транзит максимальных фракций донных наносов по формуле (3.4). Рекомендуемый уклон галереи

$$i_{gal} = \lambda\,(Q_{gal}/A_{gal})^2/2gR,$$

где λ — коэффициент гидравлического сопротивления по длине, $\lambda = 0{,}003 + 1/[16(1{,}74 + 2\lg 2R(d_m)]$; R — гидравлический радиус галереи; d_m — средний диаметр наносов.

В ферганских водозаборах рекомендуется: сужать ширину фронта плотины до $0{,}7 \ldots 0{,}8\,B_{st}$; дополнительно определять потери напора на входном криволинейном пороге.

Для донно-решетчатых водозаборов (см. табл. 3.5) ширину водоприемника b_l назначают из условия пропуска удельных расходов $q_l = 3 \ldots 4$ м²/с, но не более 10 м. При водозаборном узле с наносоперехватывающей галереей высоту порога принимают 1,5 ... 2,5 м от отметки понура плотины. Длину решетки (ширину донной галереи) определяют по формуле

$$l_l = Q_c/(\mu p \gamma_з b_l \sqrt{2gh_m}), \qquad (3.8)$$

где μ — коэффициент расхода, $\mu = 0{,}62 \ldots 0{,}64$; p — относительный просвет решетки при толщине стержня $t = 5 \ldots 8$ мм и просвете $a = 8 \ldots 10$ мм; $\gamma_з$ — коэффициент засорения решетки, $\gamma_з = 0{,}8 \ldots 0{,}9$; h_m — средняя глубина воды

над решеткой, $h_m = 0{,}5(h_1 + h_2)$ (h_1 и h_2 — глубины соответственно при подходе к решетке и за ней);

$$h_1 = 0{,}75 \sqrt[3]{\alpha q^2_{\min}/g};$$

$$h_2 = 0{,}75 \sqrt[3]{\alpha (q_{\min} - q_l)^2/g}, \qquad (3.9)$$

где $q_{\min}$ — удельный расход реки в межень, равный $Q_{\min}/b_l$ ($Q_{\min}$ — меженный расход воды в реке); α — коэффициент кинетической энергии.

При $l_l > 3$ м устраивают вторую галерею.

Размеры галереи определяют упрощенным расчетом, предполагая линейное возрастание расходов реки по ее длине. Скорости воды обычно принимают — в начале галереи $v_{ent} = 1{,}5 \ldots 2$ м/с, в конце $v_{ext} = 2{,}5 \ldots 3$ м/с. Разбив ширину галереи $b_l = 1{,}2\, l_l$ на участки с примерно постоянным расходом (рис. 3.3), определяют гидравлические характеристики сечения x:

$$Q_x = q_l x; \qquad v_x = v_{ent} + (v_{ext} - v_{ent})\, x/L;$$

$$A_x = Q_x/v_x; \qquad h_x = A_x/b_x; \qquad i_x = v^2_x/c^2_x R^2_x;$$

$$C_x = R^{1,6}_x/n; \qquad R_x = b_x h_x/(b_x + 2h_x); \qquad h_{w,x} = i_x l, \qquad (3.10)$$

где L — общая длина галереи; l — длина участка; $h_{w,x}$ — гидравлические потери на участке; C_x — коэффициент Шези для того же участка; n — коэффициент шероховатости.

Уровни воды в расчетных сечениях галереи зависят от уровня воды в канале: $УВГ = УВК + \Sigma h_{w,x}$. Для обеспечения безнапорного течения воды в галерее в начальном сечении предусматривают запас по высоте $d_0 = 0{,}15 \ldots 0{,}25$ м (см. рис. 3.3).

Для водозаборных сооружений с косонаправленным ступенчатым порогом повышенную часть перед решеткой принимают прямолинейной либо с радиусом очертания в плане $r > 2B_l$ и длиной $2B_l$, где B_l — ширина водозаборного фронта порога. Пониженную часть принимают с радиусом очертания в плане $r = (0{,}4 \ldots 0{,}8) B_l$. Высота повышенной части порога составляет 1 ... 2 м, пониженной — 0,5 ... 1 м, продольный уклон порога — 0,005 ... 0,2. Для эффективного отвлечения наносов рекомендуется через повышенную часть порога пропускать 30 ... 50%, а через пониженную — 67 ... 35% расхода, поступающего на решетку. Через промывное отверстие в быке вместе с наносами сбрасывается 3 ... 10% воды.

При послойно-решетчатом водозаборе высоту затапливаемых быков назначают 0,3 ... 0,75 м, ширину — 1 ... 1,5 м. Решетки нижнего яруса имеют уклон 0,1 ... 0,15; верхнего — 0,05 ... 0,1. Длину нижней решетки при глубине воды над ней ниже быка определяют по формуле (3.8). Ширину наносоперехватывающей траншеи принимают 0,7 ... 1 м при уклоне ее дна к промывным отверстиям плотины $i_t \geqslant 0{,}1$.

Общий захват наносов траншеей

$$\alpha_s = \Sigma p_i \alpha_{si},$$

где p_i — удельное содержание фракций наносов; α_{si} — удельный захват траншеей i-й фракции наносов, определяют по графикам рисунка 3.4. При $\alpha_s < 0{,}85$ ширину траншеи b_t увеличивают и расчет повторяют.

Бесплотинный водозабор рассчитывают на пропуск форсированных расходов при минимальных перепадах уровней воды в реке и в магистральном канале. Размеры пролетов шлюзов-регуляторов принимают стандартными. При этом удельные расходы воды шлюзов-регулято-

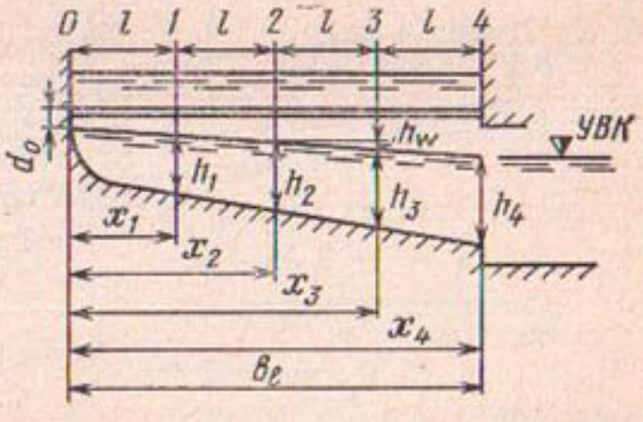


Рис. 3.3. Расчетная схема водозаборной галереи донно-решетчатого водозабора

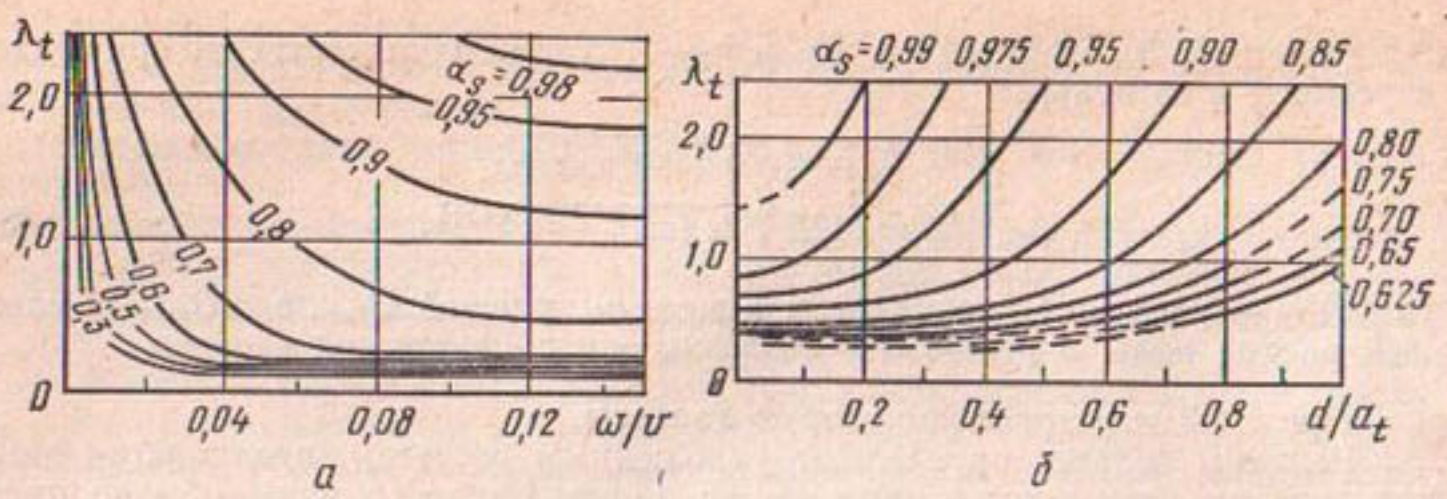


Рис. 3.4. Зависимости для определения удельного захвата донных наносов α_s:
а — при $w/v<0{,}12$ $\alpha_s=f(\lambda_t,\ w/v)$; *б* — при $w/v>0{,}12$ $\alpha_s=f(\lambda_t,\ d/a)$; w — гидравлическая крупность фракций наносов; v — скорость воды в подводящем русле; $\lambda_t=gb_t/v^2$; b_t — ширина наносоперехватывающей траншеи; d — диаметр фракций наносов; a_t — просвет решетки

ров бесплотинных водозаборов назначают в 1,5...2 раза меньше удельных расходов воды в реке в период интенсивного транспорта донных наносов. Перед шлюзом-регулятором устраивают порог высотой не менее 1,5...2 м, снижающий захват донных наносов.

Размеры каналов-прокопов определяют из условия перемещения по ним землесосных снарядов (среднюю глубину в них принимают 2,5...3 м), а при гидравлическом промыве наносов — по формулам для расчета ирригационных отстойников (см. п. 3.5).

Промывные каналы проверяют на транспортирующую способность поступающей из отстойников пульпы и отсутствие подтопления устья промывного канала со стороны реки.

3.2.5. ЗАНЕСЕНИЕ И ПРОМЫВ ВБ

В условиях интенсивного прироста орошаемых земель в горно-предгорных районах коэффициенты водозабора на водозаборных гидроузлах доводят до 1. Рациональный режим эксплуатации при этом — перевод водозаборного сооружения в режим периодического занесения и промыва ВБ.

Занесение подпертого бьефа водозаборного гидроузла при высоких коэффициентах забора воды из реки ($k_c>0{,}7$) происходит в три стадии. Продолжительность первой стадии — от начала занесения ВБ до начала поступления наносов в водоприемник. Этот период безнаносной работы водоприемника является допустимым временем занесения ВБ t_{adm}, а объем наносов, накопившихся за этот период, — допустимым объемом занесения V_{adm}. За-

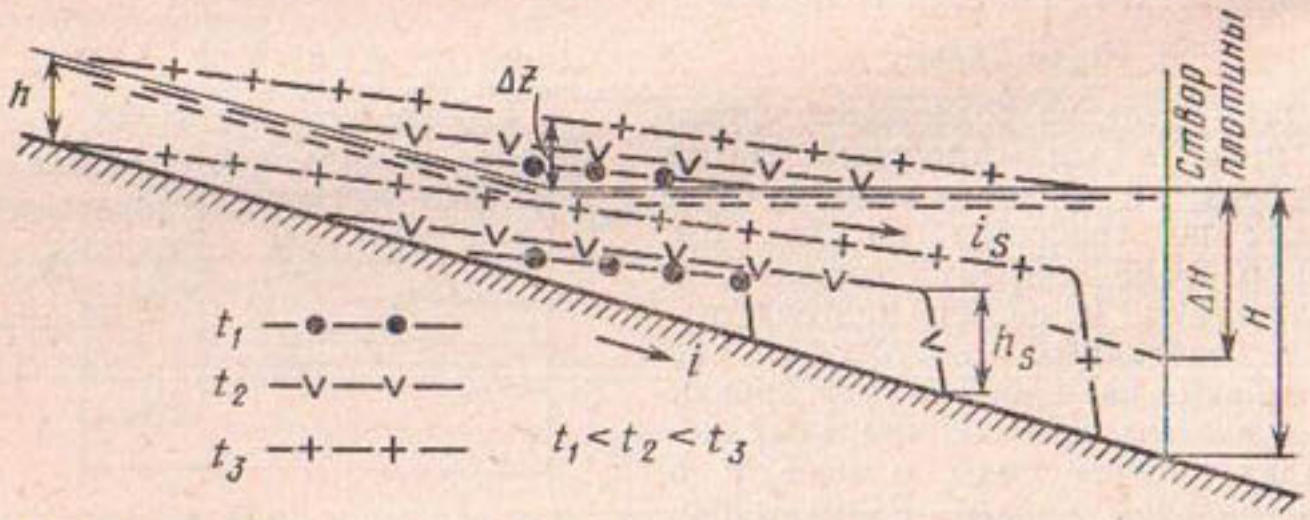


Рис. 3.5. Схема занесения ВБ водозаборного сооружения:
h — глубина воды в реке; t_1, t_2, t_3 — продолжительность стадий занесения

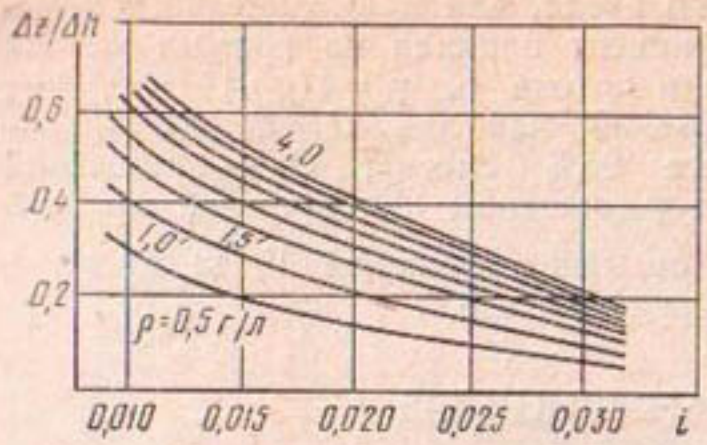


Рис. 3.6. Зависимость подъема уровня свободной поверхности воды $\Delta z/\Delta H$ при занесении ВБ от уклона русла i и концентрации донных наносов в речном потоке ρ

тем наступает вторая стадия занесения, концом которой является момент стабилизации объемов занесения в подводящем русле. Третья стадия характеризуется установившимся транспортом всех наносов в водоприемник ($k_c=1$) либо в водоприемник и НБ ($k_c<1$).

Первая стадия занесения ВБ — наиболее оптимальная для эксплуатации водозаборных гидроузлов.

3.7. Уклон поверхности гряды занесения i_s

Концентрация донных наносов в речном потоке, г/л	Продольные уклоны дна реки i					
	0,01	0,015	0,02	0,025	0,03	0,035
1	0,0058	0,0068	0,0054	0,0002	—0,008	—0,015
2	0,0072	0,0083	0,0077	0,0036	—0,0012	—0,007
3	0,0081	0,0097	0,0091	0,0058	0,0017	—0,002
4	0,0092	0,0108	0,0102	0,0073	0,0036	0,0006

Продолжительность ее и объем накопившихся в ВБ наносов определяют по формулам

$$t_{adm} = \rho_s h^2_s/[2\,(i-i_s)\,q_s]; \qquad (3.11)$$

$$V_{adm} = h^2 B_{st}/[2\,(i-i_s)], \qquad (3,11')$$

где ρ_s и q_s — плотность и удельный расход наносов в реке; h_s — высота гряды наносов в конце первой стадии, $h_s=1{,}12\Delta H^2/H$ [ΔH и H — соответственно подпор и напор в створе водозаборного сооружения (рис. 3.5)]; i — уклон дна реки; i_s — уклон гряды наносов, при $i<0{,}01$ $i_s=0{,}6\ldots0{,}7$, а при $i>0{,}01$ i_s определяют по таблице 3,7; B_{st} — ширина подводящего русла.

Наибольший подъем уровня свободной поверхности водного потока в заносимом бьефе Δz, определяющий высоту струенаправляющих дамб, прогнозируют по графикам (рис. 3.6).

Продолжительность полного промыва T, накопленных в ВБ отложений, вычисляют по формулам:

при гравелисто-галечниковых наносах

$$T = 1{,}7\gamma_f\gamma_\rho V^2_{adm}/(\sqrt{C_s}h^2_s B_{st} Q_w); \qquad (3.12)$$

при песчаных наносах

$$T = [V_{adm}/(2{,}3h^{1{,}13}Q^{0{,}79}_w)]^{2{,}3}, \qquad (3.13)$$

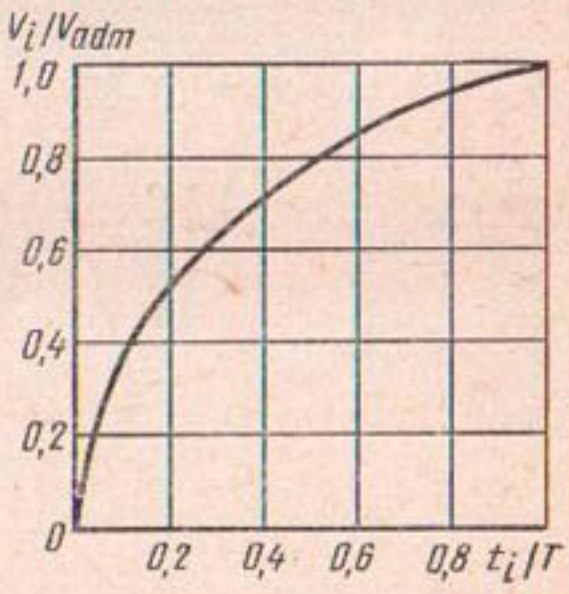


Рис. 3.7. График для определения объема промытых наносов при частичном промыве ВБ

где γ_f — коэффициент формы подводящего русла, для прямолинейного $\gamma_f=1$, и для криволинейного $\gamma_f=2$; γ_ρ — коэффициент влияния на промыв уклона реки i и концентрации донных наносов в потоке ρ, $\gamma_\rho=4(g\rho_s)^{0,22}i^{0,6}/\rho^{0,22}$; C_s — коэффициент неоднородности отложений наносов, $C_s=d_{95}/d_m$ (d_{95} — диаметр наносов, составляющих по массе 95% смеси); Q_w — промывной расход; h — снижение уровня воды в створе плотины при промыве наносов.

При частичном промыве ВБ объем смытых отложений V_t за время t_t рассчитывают по графику, приведенному на рисунке 3,7.

3.3. ВОДОХРАНИЛИЩНЫЕ МЕЛИОРАТИВНЫЕ ГИДРОУЗЛЫ

3.3.1. ОСНОВНЫЕ ТИПЫ И ИХ СРАВНИТЕЛЬНАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА

Водохранилищный гидроузел — речной гидроузел, обеспечивающий регулирование речного стока (сезонное, годичное или многолетнее) с помощью водохранилища. В зависимости от напора, создаваемого водоподпорным сооружением, водохранилищные гидроузлы разделяют на безнапорные, низконапорные (H до 10 м), средненапорные (10 м$<H<$50 м) и высоконапорные ($H>$50 м). Последние подразделяют на гидроузлы с высокими (60...100 м), очень высокими (100...200 м) и сверхвысокими (200...350 м и более) плотинами. Сравнительная характеристика водохранилищных гидроузлов приведена в таблице 3.8, а примеры их компоновок — на рисунках 3.8...3.10.

Основные отличия от речных водозаборов: гарантированный водоотбор независимо от водности водотока; исключение отстойников и наносоперехватывающих устройств (основная масса наносов осаждается в водохранилищах); высокое качество отбираемой воды в отношении наносов.

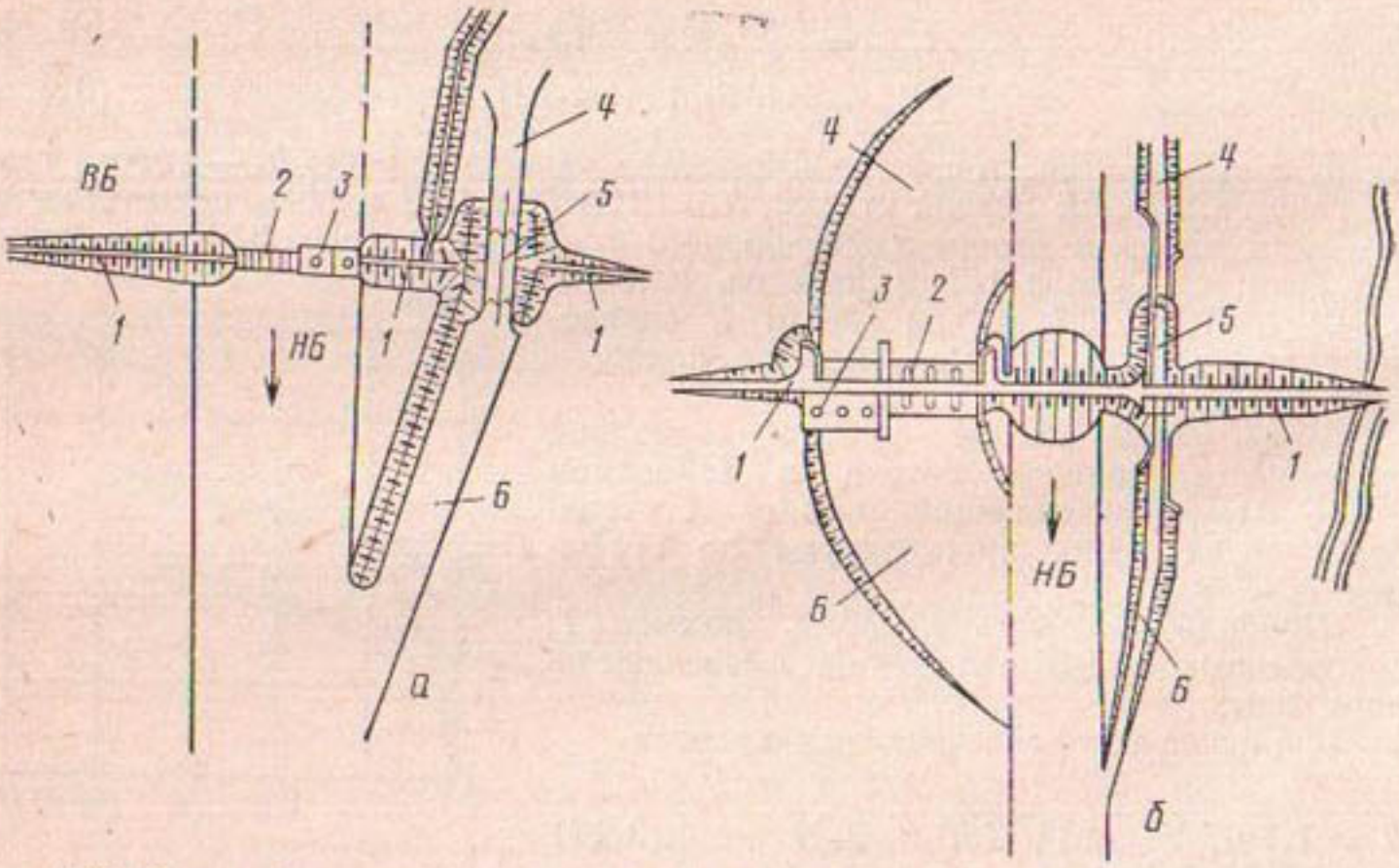
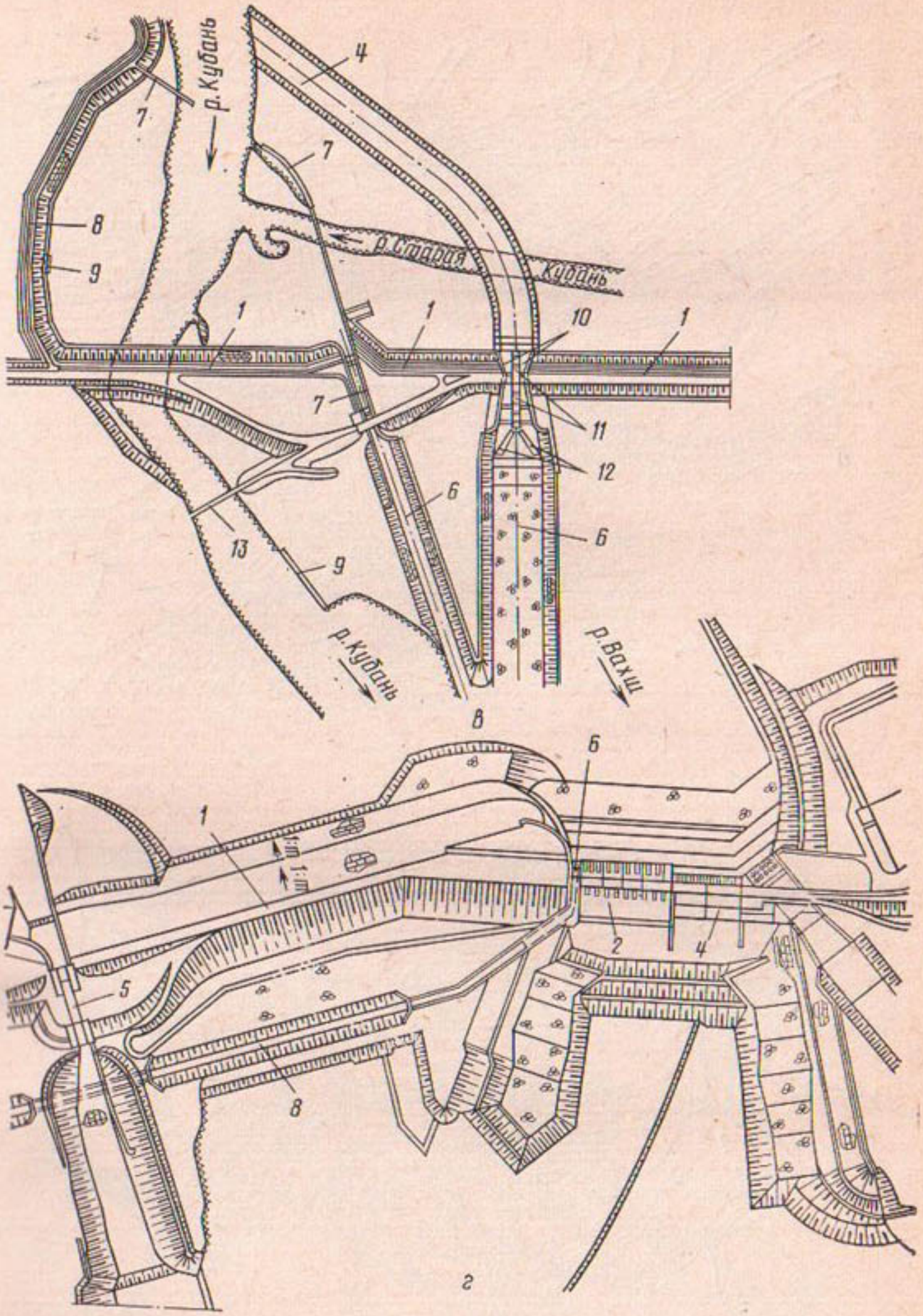


Рис. 3.8. Основные схемы компоновок средненапорных гидроузлов:

а, б — соответственно русловая и пойменная компоновки; *в* — Краснодарский узел на
1 — водосбросная плотина; *3* — ГЭС; *4* — подводящий канал (ГЭС, водосброса, судоходного шлю-
8 — дамба; *9* — пристань; *10* — водосброс; *11* — рыбоподъемник; *12* — рыбонаправляющие



р. Кубань; *г* — Тюя Муюнский на р. Амударья; *1* — грунтовая плотина; *2* — бетонная вода); *5* — судоходный шлюз; *6* — отводящий канал (ГЭС, водосброса, шлюза); *7* — мод прорези; *13* — мост

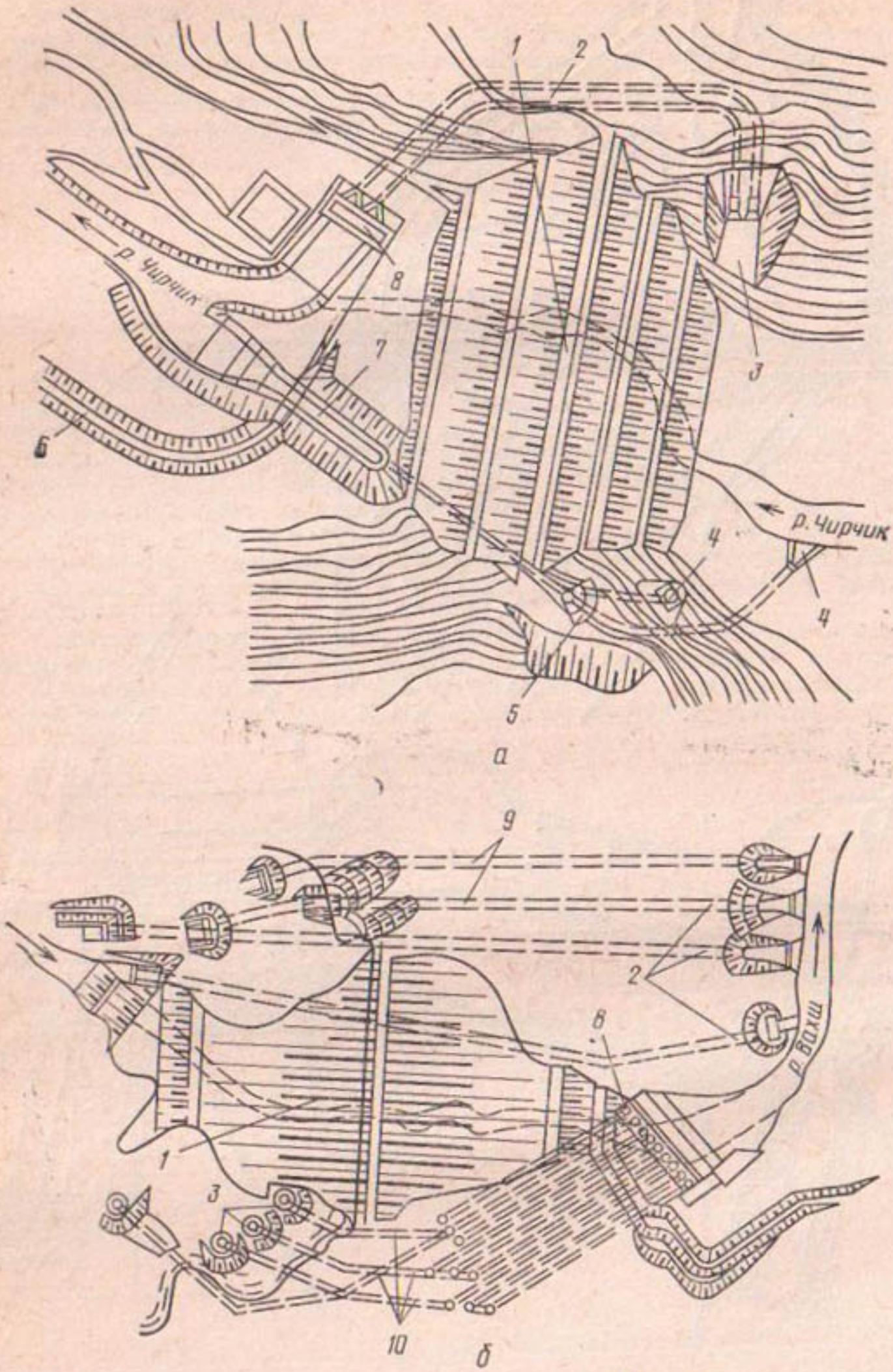
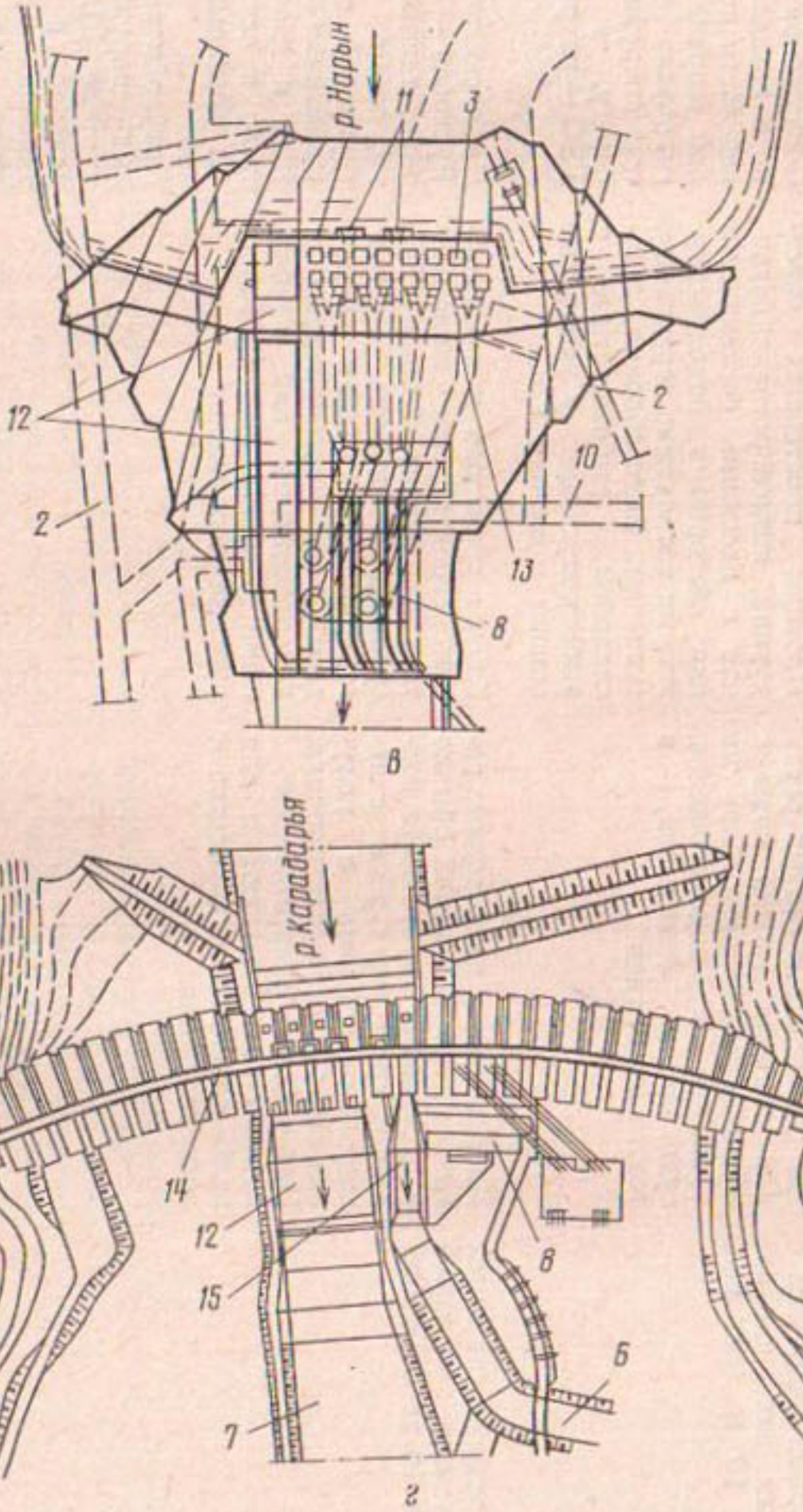


Рис. 3.9. Основные схемы компоновок высоконапорных гидроузлов:

а — Чарвакский гидроузел на р. Чирчик; *б* — Нурекский гидроузел на р. Вахш; *в* — *1* — грунтовая плотина; *2* — строительные туннели; *3* — водоприемник ГЭС; *4* — входной *8* — ГЭС; *9* — водосброс; *10* — напорные туннели; *11*, *12* — аварийный и поверхностный контрфорсами; *15* — водовыпуск



Токтогульский гидроузел на р. Нарын; *г* — Андижанский гидроузел на р. Карадарья; оголовок водосброса; *5* — шахтный водосброс; *6, 7* — магистральный и отводящий каналы; водосбросы; *13, 14* — бетонная плотина соответственно гравитационная и со спаренными

3.8. Характеристика водохранилищных гидроузлов

Тип гидроузла	Область применения, назначение	Основные сооружения	Особенности компоновки
Низконапорный гидроузел с создаваемым плотиной напором до 10 м (см. рис. 3.8)	На равнинных и горных реках для подъема уровня воды с целью обеспечения отбора на орошение и водоснабжение, судоходства, лесосплава, а также энергетики	Плотины простейших конструкций: низкопороговая бетонная с плоскими, сегментными или секторными вододействующими затворами; деревянные, тканевые. Водозаборные, лесосплавные, рыбозащитные и рыбопропускные. Судоходные шлюзы и здания ГЭС	Сооружения располагают обычно в пределах русла и в нижней части поймы реки. При малой ширине реки в створе гидроузла часть водопропускных сооружений размещают на берегу, а шлюз и здание ГЭС — на разных берегах
Средненапорный гидроузел с создаваемым плотиной напором от 10 до 50 м (см. рис. 3.9)	На равнинных многоводных реках с широкой поймой обычно в нескальных грунтах. На горных и предгорных реках с неширокими поймами в полускальных и скальных породах. Назначение — энергетическое, но обычно используют и для целей орошения, судоходства и водоснабжения	Глухая грунтовая и водосливная бетонная или железобетонная плотины. Здание ГЭС, судоходные шлюзы. Водозаборные сооружения одно-, двух- или многокамерные с поверхностными или глубинными отверстиями. Рыбопропускные сооружения	На нескальных основаниях. **Русловая** — водосливная плотина, здание ГЭС в русле реки, пойма перекрыта глухой грунтовой плотиной. **Пойменная** — водосливная плотина и здание ГЭС в пойме, русло и остальная часть поймы перекрыты глухой плотиной **Полупойменная** — часть бетонных сооружений располагают в русле. Шлюз при всех компоновках в пойме на большом удалении от бетонных сооружений. На скальных основаниях — аналогично высоконапорным гидроузлам в узких створах

Высоконапорный гидроузел с создаваемым плотиной напором 50 м и более (см. рис. 3.10)	На горных реках в глубоких узких ущельях из скальных грунтов при максимальных расходах воды до 4...6 тыс. м³/с. На предгорных и равнинных многоводных реках с максимальными расходами воды 10...20 тыс. м³/с и более при скальных основаниях. Назначение — энергетическое, используют для судоходства, орошения, водоснабжения	Высокие плотины — бетонные (железобетонные) с водосбросами и глухие грунтовые, здание ГЭС с водозабором и отводящими устройствами. Оросительные и хозяйственно-питьевые водозаборы, рыбопропускные сооружения. На равнинных и предгорных реках — судоходные шлюзы, судоподъемники и лесопропускные устройства	В узких створах горных рек — гравитационная или арочная плотина с водосбросами в теле плотины (в берегах — частично открытые или туннельные), здание ГЭС в теле плотины или за ней, реже подземное; при средних и малых расходах паводков — грунтовая (на многоводной реке иногда бетонная) плотина, водосбросы в берегах, здание ГЭС подземное, реже на берегу в некотором удалении от плотины. В широких створах многоводных рек — водосливная бетонная плотина в русле реки, здание ГЭС по напорному фронту либо за глухой бетонной плотиной; береговые участки перекрывают грунтовыми, при обосновании глухими бетонными плотинами. Судоходные шлюзы и судоподъемники — в скальных берегах.

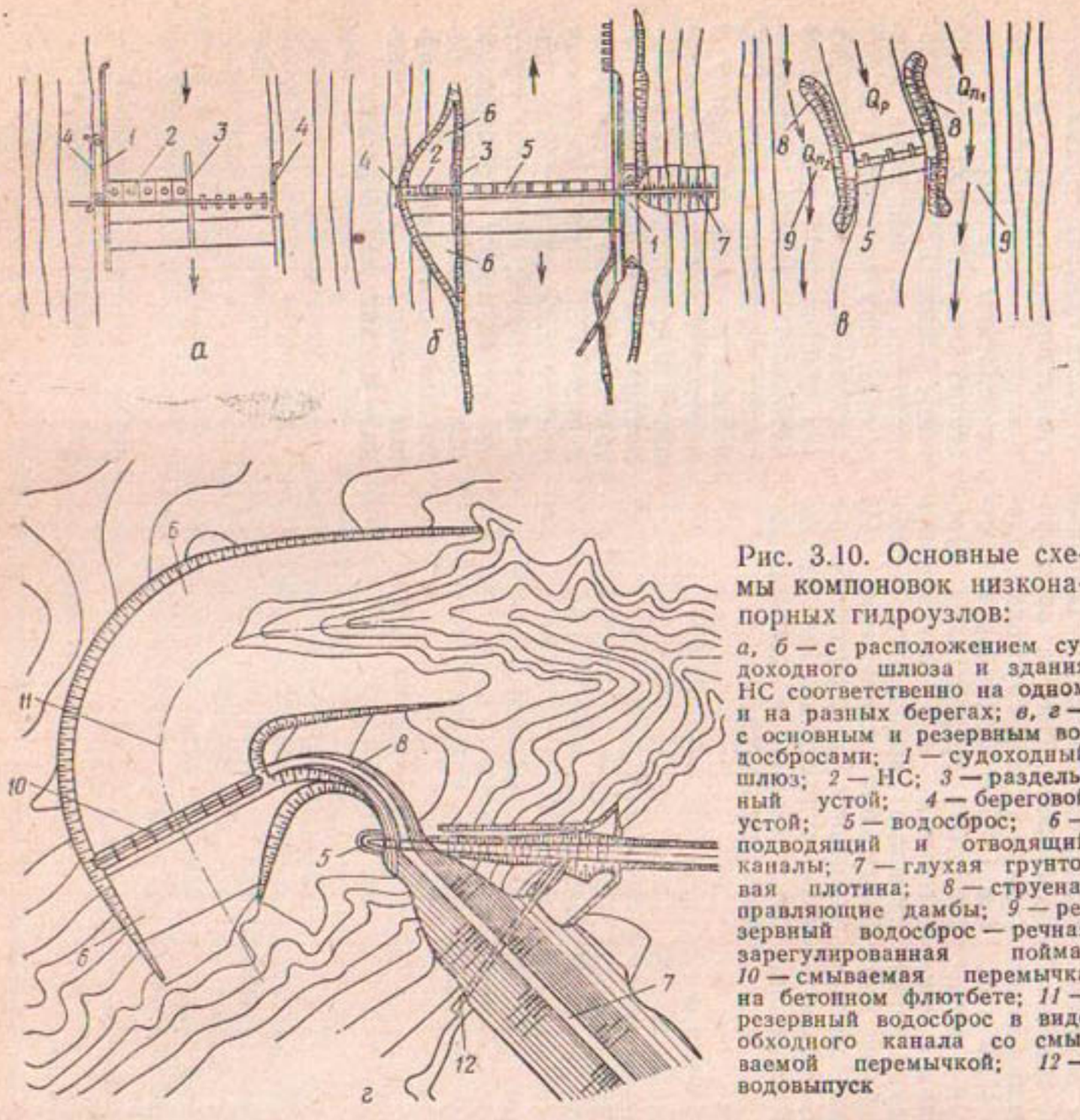


Рис. 3.10. Основные схемы компоновок низконапорных гидроузлов:

а, б — с расположением судоходного шлюза и здания НС соответственно на одном и на разных берегах; *в, г* — с основным и резервным водосбросами; *1* — судоходный шлюз; *2* — НС; *3* — раздельный устой; *4* — береговой устой; *5* — водосброс; *6* — подводящий и отводящий каналы; *7* — глухая грунтовая плотина; *8* — струенаправляющие дамбы; *9* — резервный водосброс — речная зарегулированная пойма; *10* — смываемая перемычка на бетонном флютбете; *11* — резервный водосброс в виде обходного канала со смываемой перемычкой; *12* — водовыпуск

Водозаборные сооружения в составе водохранилищного гидроузла при водозаборе в створе плотины представляют собой водовыпуски плотины: башенные, безбашенные, туннельные, а вне створа плотин (как и при водозаборе из озера, пруда и других водоемов) — обычные схемы речных водозаборов, но с учетом специфических особенностей водохранилища, колебаний приема воды и более широким применением расчистки перед водоприемником. Открытые водоприемники — это шлюзы-регуляторы, закрытые — трубчатые с затвором на выходе при напорной водоподаче, на входе — при безнапорной. Располагают их обычно на прямолинейных участках побережья, удаленных от устья реки.

Необходимый элемент водохранилищных водозаборов, особенно средне- и высоконапорных, — рыбопропускные и рыбозащитные сооружения.

3.3.2. РЫБОПРОПУСКНЫЕ И РЫБОЗАЩИТНЫЕ СООРУЖЕНИЯ ВОДОЗАБОРНЫХ ГИДРОУЗЛОВ

Рыбопропускные сооружения обеспечивают пропуск проходных и полупроходных рыб из НБ в ВБ с целью их естественного воспроизводства. Проектируют их, исходя из условий эксплуатации при уровнях воды, соответствующих паводковым расходам с вероятностью превышения 5%. Допускается использовать эти сооружения для сброса части паводков редкой повторяемости. Их делят на две основные группы: рыбоходные и рыбоподъемные (табл. 3.9).

Рыбоходные (рис. 3.11) — это сооружения, в которых рыба самостоятельно преодолевает напор при передвижении из НБ в ВБ. Предусматривают преимущественно для пропуска лососевых рыб.

Рыбоподъемные (рис. 3.12) — это сооружения, в которых перемещение рыб из НБ в ВБ осуществляют шлюзованием или транспортированием в специальных емкостях. Такие сооружения устанавливают на крупных равнинных реках с разнообразной ихтиофауной, а также на каскадах близко расположенных гидроузлов.

При проектировании рыбопропускных сооружений базируются на допустимых значениях скоростей водного потока (табл. 3.10): пороговой — минимальной скорости течения воды, при которой у рыб появляется реакция на поток воды; сносящей — скорости течения, при которой рыбу сносит потоком; рывковой — наибольшей скорости течения, которую рыба может преодолеть в течение малого промежутка времени.

Габариты рыбоподъемных сооружений устанавливают из условий обеспечения в рыбонакопителях скоростей потока более пороговых и менее сносящих, а сечения вплывных отверстий в раздельных стенках рыбоходных сооружений — из условия обеспечения в отверстиях рывковых скоростей.

Стационарные сооружения (рыбоходы, рыбопропускные шлюзы, рыбоподъемники, рыбонакопители, рис. 3.13) проектируют, когда места концентрации рыб перед гидроузлом сосредоточены и не зависят от режима работы гидроузла или рыбу можно сконцентрировать с помощью направляющих устройств вблизи привлекающего шлейфа рыбопропускного сооружения. *Передвижные* (плавучие) *сооружения* проектируют при неблагоприятных и сложных гидрологических условиях в НБ для стационарного сооружения, в рассредоточенных и периодически меняющихся местах концентрации рыб и при оборудовании уже действующих гидроузлов.

3.9. Виды рыбопропускных сооружений

Напор гидроузла, м	Рыбоходные	Рыбоподъемные
До 10	Каналы обходные Лотковые Прудковые	Рыбопропускной шлюз
10...40	Лестничные	Гидравлический рыбоподъемник
Свыше 40	Лестничные	Механический рыбоподъемник

3.10. Допускаемые скорости потока в рыбопропускных сооружениях для различного вида рыб, м/с

Скорости	Проходные				Полупроходные	
	осетровые		лососевые			
	взрослые особи	молодь	взрослые особи	молодь	взрослые особи	молодь
Пороговая	0,15...0,2	—	0,2...0,25	—	0,15...0,2	—
Сносящая	0,9...1,2	0,15...0,2	1,1...1,6	0,25...0,35	0,9...1,2	0,15...0,25
Рывковая	—	—	1,5...1,7	—	—	—

Примечание. Осетровые — осетр, севрюга, белуга и др.; лососевые — лосось, семга, горбуша и др.; полупроходные — лещ, судак, сазан, вобла и др.

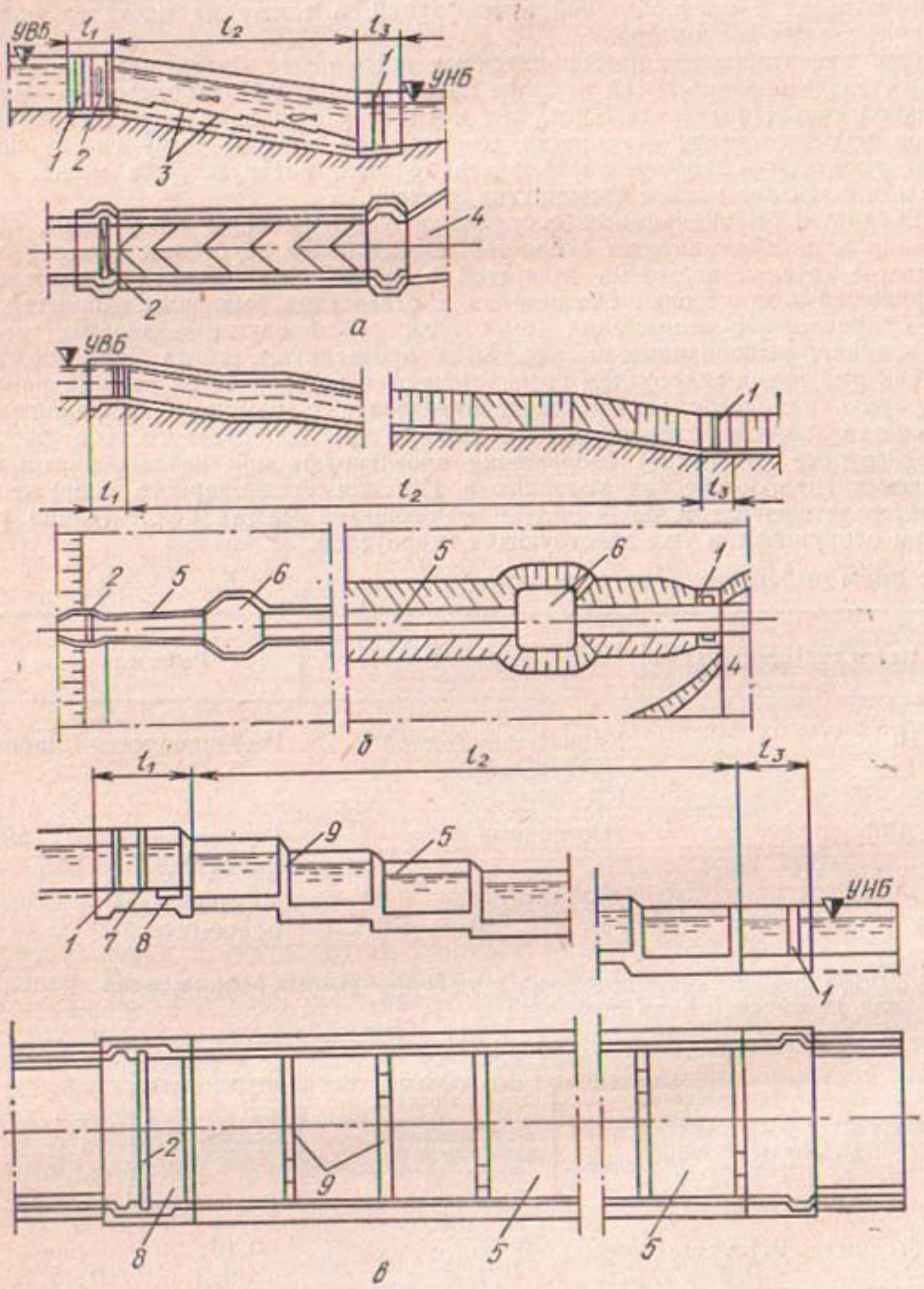


Рис. 3.11. Рыбоходные сооружения:

а — лотковые; *б* — прудковые; *в* — лестничные; *1* — пазы ремонтных заграждений; *2* — регулятор расхода воды; *3* — гаситель скорости воды в тракте; *4* — подходной участок; *5* — камеры тракта; *6* — прудки для отдыха; *7* — блок питания; *8* — ихтиологическое устройство; *9* — раздельные стенки; l_1 — входной оголовок; l_2 — тракт; l_3 — голова канала

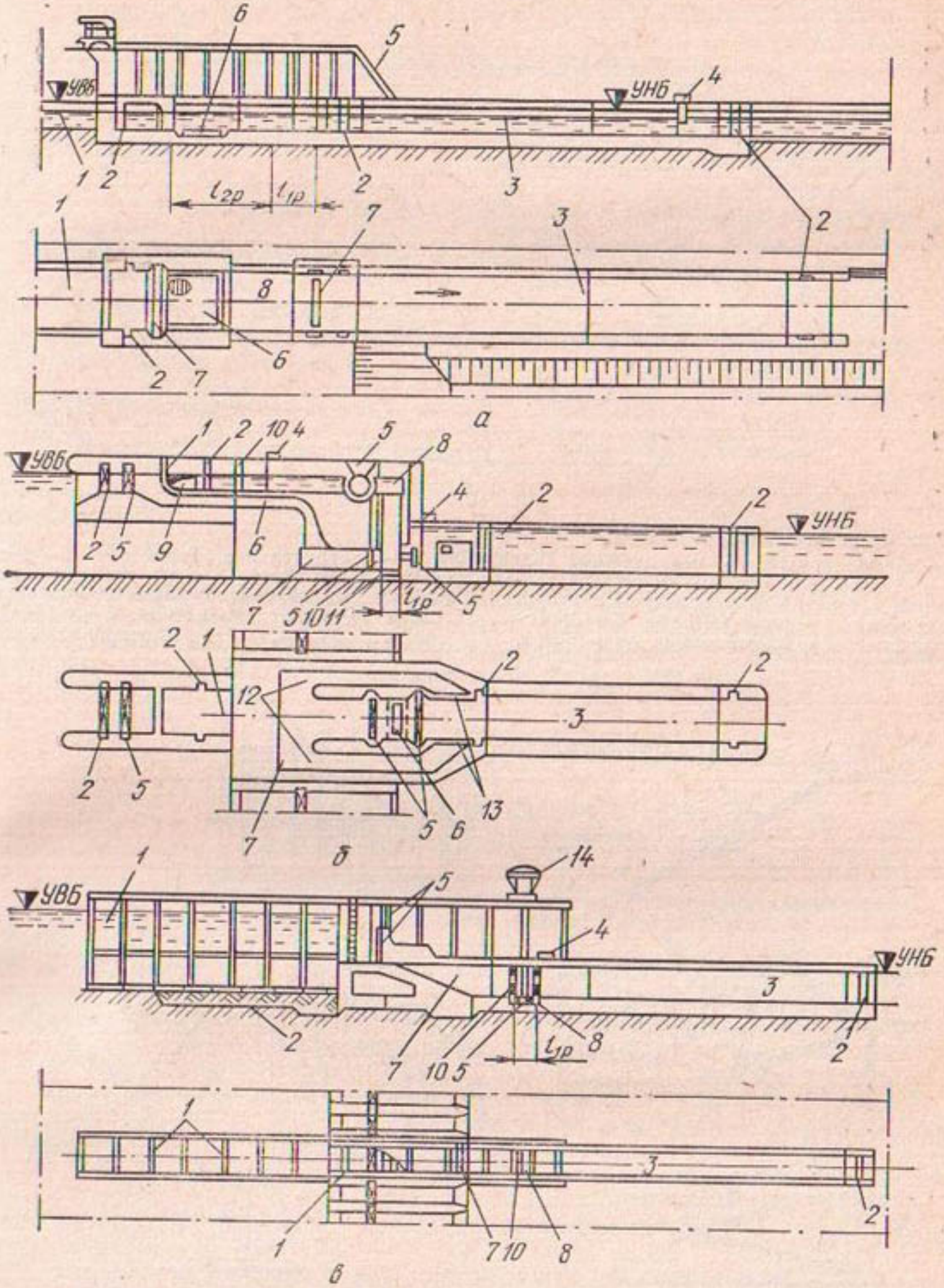


Рис. 3.12. Рыбоподъемные сооружения:

а — рыбопропускной шлюз; *б* — гидравлический рыбоподъемник; *в* — механический рыбоподъемник; *1* — верховой (выходной) лоток; *2* — аварийно-ремонтные заграждения; *3* — рыбонакопитель; *4* — побудительное устройство; *5* — затворы эксплуатационные и блоков питания; *6* — ихтиологическое устройство; *7* — блок питания; *8* — рабочая камера; *9* — вплывные отверстия; *10* — сетчатые затворы; *11* — подъемная площадка; *12* — обходные галереи; *13* — стационарные рыбозащитные решетки; *14* — кран-контейнеровоз.

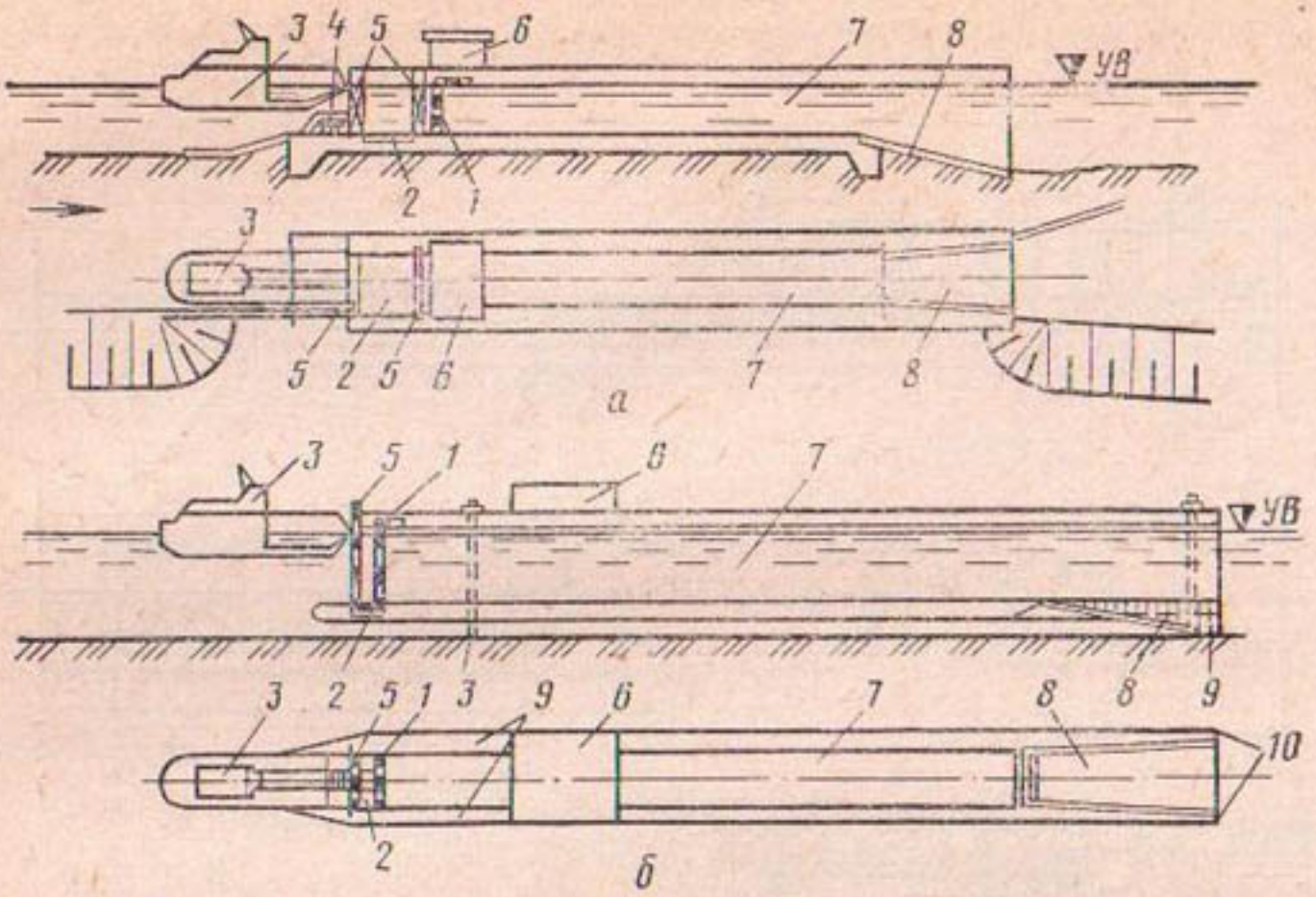


Рис. 3.13. Рыбонакопители:

а — стационарный; *б* — передвижной (плавучий): *1* — побудительное устройство; *2* — приспособление для перегрузки рыб из рыбонакопителя в устройство для их транспортирования; *3* — устройство для транспортирования рыб от рыбонакопителя через сооружения гидроузла; *4* — блок питания; *5* — сетчатые затворы; *6* — пульт управления; *7* — рыбонакопитель; *8* — сопрягающие устройства; *9* — свайные опоры; *10* — рыбонаправляющее устройство

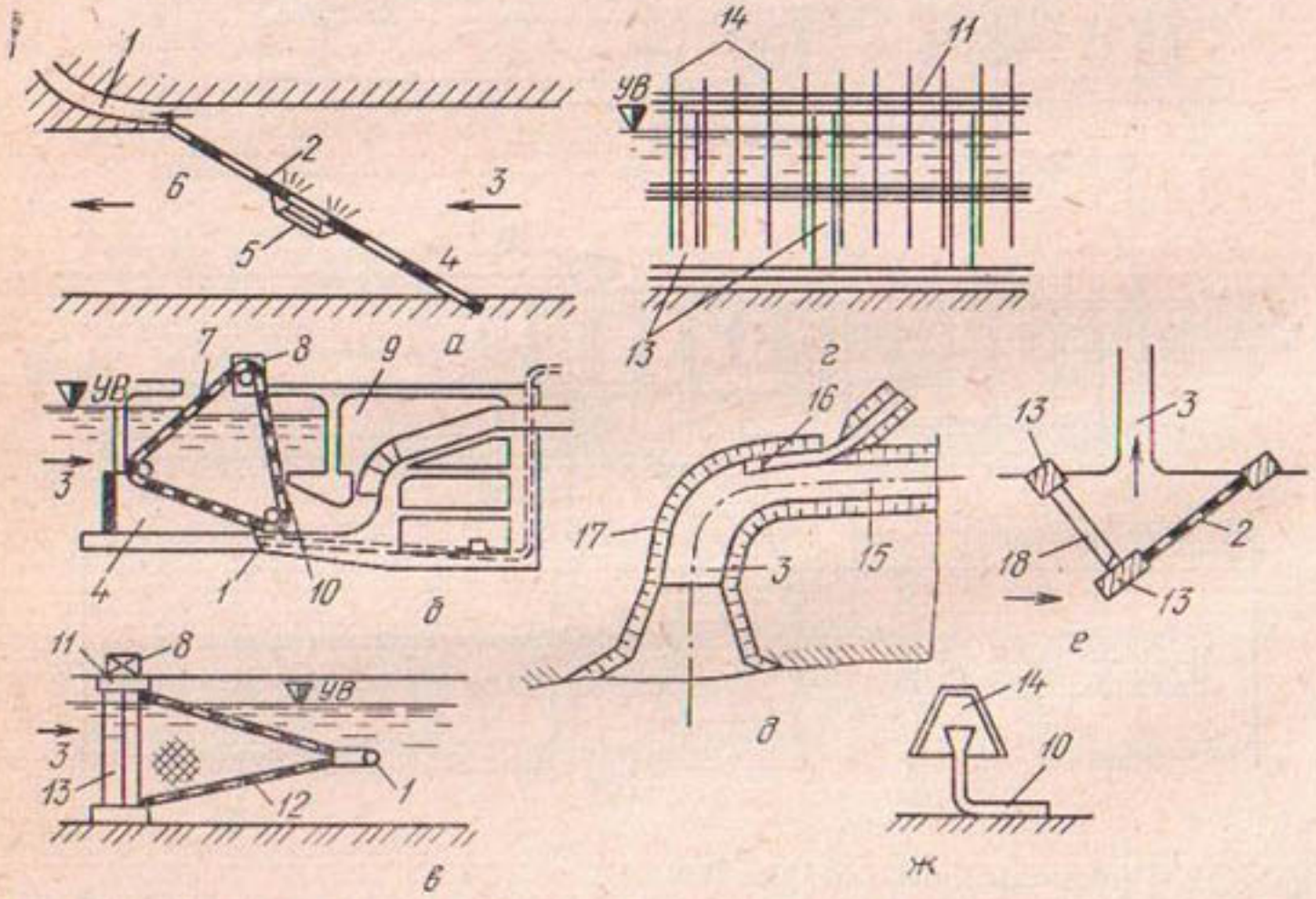


Рис. 3.14. Основные виды рыбозащитных сооружений:

а — плоские сетки с рыбоотводом; *б* — ленточные вращающиеся сетки с рыбоотводом; *в* — конусные с рыбоотводом; *г* — электрические рыбозаградители; *д* — обходные тракты (каналы); *е* — перемещающиеся зонные ограждения; *ж* — зонтичные оголовки водозаборов; *1, 16* — рыбоотводящий тракт и его оголовок; *2* — рыбозаградительный экран; *3, 15, 17* — водозаборный магистральный, криволинейный каналы; *4* — аванкамера; *5* — промывное устройство; *6* — арьеркамера; *7* — вращающаяся сетка; *8* — привод; *9* — насосная станция; *10* — водозабор насосной станции; *11* — мост; *12* — конусный рыбозаградитель; *13* — опорные быки; *14* — зонтичный головок

3.11. Виды рыбозащитных сооружений

Рыбозаградительные		Рыбоотводные (инженерно-экологические)	Рыбоотгораживающие (экологические)
экранные	физиологические		
Жалюзи	Электрические	Обходные тракты (каналы)	Запани
			Стационарные зонные ограждения
Плоские сетки с рыбоотводами	Пневматические	Обходные тракты (каналы) с бассейнами для накопления рыб	Перемещающиеся зонные ограждения
Ленточные вращающиеся сетки с рыбоотводами	Зрительно-световые		Зонтичные оголовки водозаборов
	Звуковые		Донные водозаборы
Сетчатые барабаны с рыбоотводами			Поверхностные водозаборы
Конусные с рыбоотводами			
Многоконусные с рыбоотводами			
Фильтрующие			

Рыбозащитные сооружения (рис. 3.14) предусматривают для предупреждения травмирования и гибели рыб у конструкций гидротехнических сооружений, а также для направления рыб в рыбопропускные сооружения. Основные виды рыбозащитных сооружений приведены в таблице 3.11.

3.4. ВОДОХРАНИЛИЩА

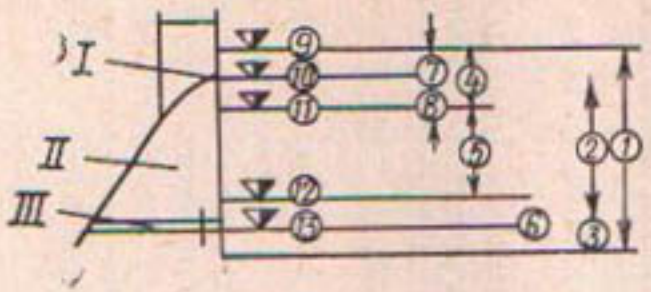
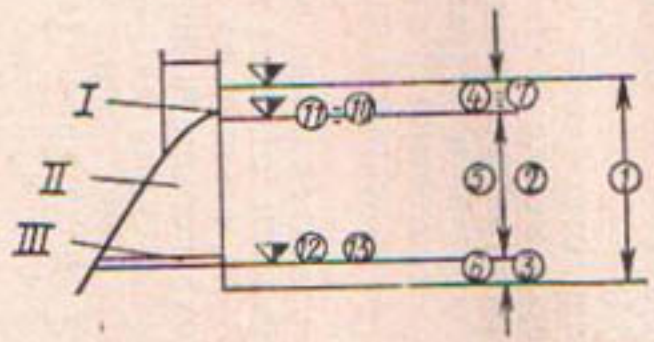
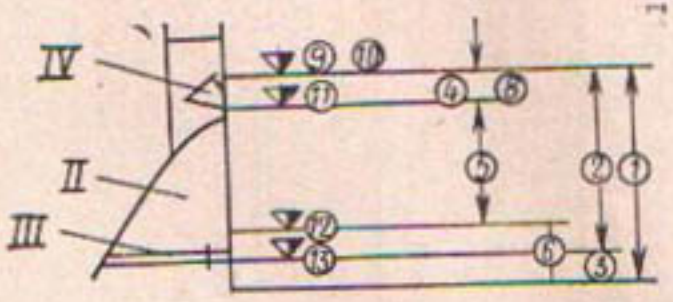
3.4.1. КЛАССИФИКАЦИЯ. ОСНОВНЫЕ ТРЕБОВАНИЯ К ПРОЕКТИРОВАНИЮ

Водохранилище — искусственный водоем для аккумуляции воды и регулирования стока, образованный водоподпорным сооружением на водотоке, заполнением естественной (искусственной) впадины на поверхности земли или обвалованием части территории. Уровень воды в водохранилище может изменяться в значительных пределах (на десятки метров). Расчетные уровни в водохранилище и соответствующие им вместимости даны в таблице 3.12, а классификация водохранилищ по расположению и водохозяйственному назначению — в таблице 3.13.

Характеризуются водохранилища отношением его полезного объема V_{br} к площади зеркала A: V_{br}/A, которое можно считать средней глубиной. Для определения V_{br} и A пользуются батиграфическими кривыми $V=f_1(z)$ и $A=f_2(z)$, где z — отметки уровня воды в водохранилище, определяемые по топографии местности. Чем больше отношение V_{br}/A, тем лучше характеристика водохранилища. Для горных водохранилищ допустимо его значение 8...15 и более, для равнинных — 2...5.

Створ для размещения чаши водохранилища выбирают исходя из условия обеспечения топографией местности отметок расчетных уровней, отвечающих оптимальным значениям V_{br}/A, а также из прогноза динамики дополнительного подпора в начале водохранилища и зоны подтопления. Предпочтение отдают варианту, при котором сумма затрат на строительство и основные мероприятия, предусмотренные при создании водохранилищ (табл. 3.14), отнесенная к единице продукции (1 м³ полезной емкости, 1 кВт·ч электроэнергии и др.), наименьшая.

3.12. Вместимости и уровни водохранилища

Схемы наполнения	Вместимость	Уровень
	*Полный объем 1* — объем между максимальным уровнем воды и ложем водохранилища *Полезный объем 5* — часть полного объема, используемая для регулирования стока, то есть для обеспечения водозабора и попусков воды в НБ *Мертвый объем 6* — часть полного объема, не используемая для регулирования стока при нормальных условиях эксплуатации	*Нормальный подпорный уровень* НПУ — наивысший проектный подпорный уровень ВБ, который можно поддерживать при нормальной эксплуатации
	*Неопорожняемый объем 3* — часть мертвого объема, расположенная ниже отметки глубинных отверстий, которая не может быть опорожнена самотеком	*Форсированный подпорный уровень* ФПУ — проектный подпорный уровень выше нормального, временно допускаемый в ВБ при чрезвычайных условиях эксплуатации *Максимальный подпорный уровень 9* — наивысший уровень воды, определяемый на основе водохозяйственных расчетов
	*Противопаводковый объем 4* — часть полного объема, используемая для регулирования паводочных расходов *Неуправляемый 7* (управляемый *8*) *противопаводочный объем* — часть объема *4*, находящаяся выше (ниже) гребня водослива, не перекрываемого затворами, или отметки подпора, поддерживаемого затворами *Управляемый объем водохранилища 2* — объем, уровень воды в котором регулируется при помощи гидромеханического и гидросилового оборудования водосливных, водопропускных и водозаборных отверстий	*Уровень полезного объема 11* *Уровень мертвого объема 12* *Уровень неопорожняемого объема 13* *Уровень управляемого объема 10*

Примечание. *I* — гребень водослива; *II* — тело плотины; *III* — водовыпуск; *IV* — затвор водослива.

3.13. Классификация мелиоративных водохранилищ

По местоположению	По назначению	По объему наполнения
Долинное (русловое) — образуется перегораживанием русла и долины водотока водоподпорным сооружением *Наливное* — образуется затоплением понижений вне речной долины в период избытка воды в водотоке *Озерное* — образуется путем подпора естественного озера	*Годового* (сезонного, месячного, недельного, суточного) регулирования — водохранилище с годичным (сезонным, месячным, недельным, суточным) циклом пополнения и сработки полезного объема *Многолетнего* регулирования — водохранилище с циклом пополнения и сработки полезного объема больше одного года *Резервное* — водохранилище, используемое как запасной источник водоснабжения при перебоях водоподачи из источника регулярного водоснабжения	*Пруд* — полный объем менее 1 млн. м³, площадь зеркала воды менее 1 км² *Малое* — полный объем 1...10 млн. м³, площадь зеркала воды 1...2 км² *Крупное* — полный объем более 10 млн. м³, площадь зеркала воды свыше 2 км²

3.14. Основные мероприятия по созданию водохранилищ

Для предотвращения нарушений, вносимых в хозяйственную жизнь и природные условия	Для рационального использования водохранилища	Сопутствующие мероприятия
Восстановление теряемых сельскохозяйственных территорий; инженерная защита различных объектов; переселение жителей из зоны водохранилища, инженерная подготовка и благоустройство новых и расширяемых поселков, землеустройство вокруг этих поселков; перенос различных объектов; разведка и добыча полезных ископаемых; восстановление рыбных запасов; сохранение качества воды в бьефах; охрана природы и т. п. В интересах здравоохранения осуществляют: санитарную очистку ложа водохранилища; противомалярийные мероприятия; общую и санитарную лесоочистку	Строительство водозаборных сооружений мелиоративных систем и систем водоснабжения; транспортная подготовка бьефов; рыбохозяйственное освоение; сельскохозяйственное использование мелководий; организация санитарной охраны	Лесосводка; выявление и охрана археологических, исторических и палеонтологических памятников; строительство спортивных, туристических, санитарно-оздоровительных и других сооружений

Инженерная защита состоит из комплекса гидротехнических мероприятий, проведение которых позволяет защитить отдельные объекты и территории от неблагоприятного воздействия водохранилищ. К таким мероприятиям относятся: обвалование территорий и отвод с них поверхностных (и грунтовых) вод; укрепление берегов и откосов существующих грунтовых

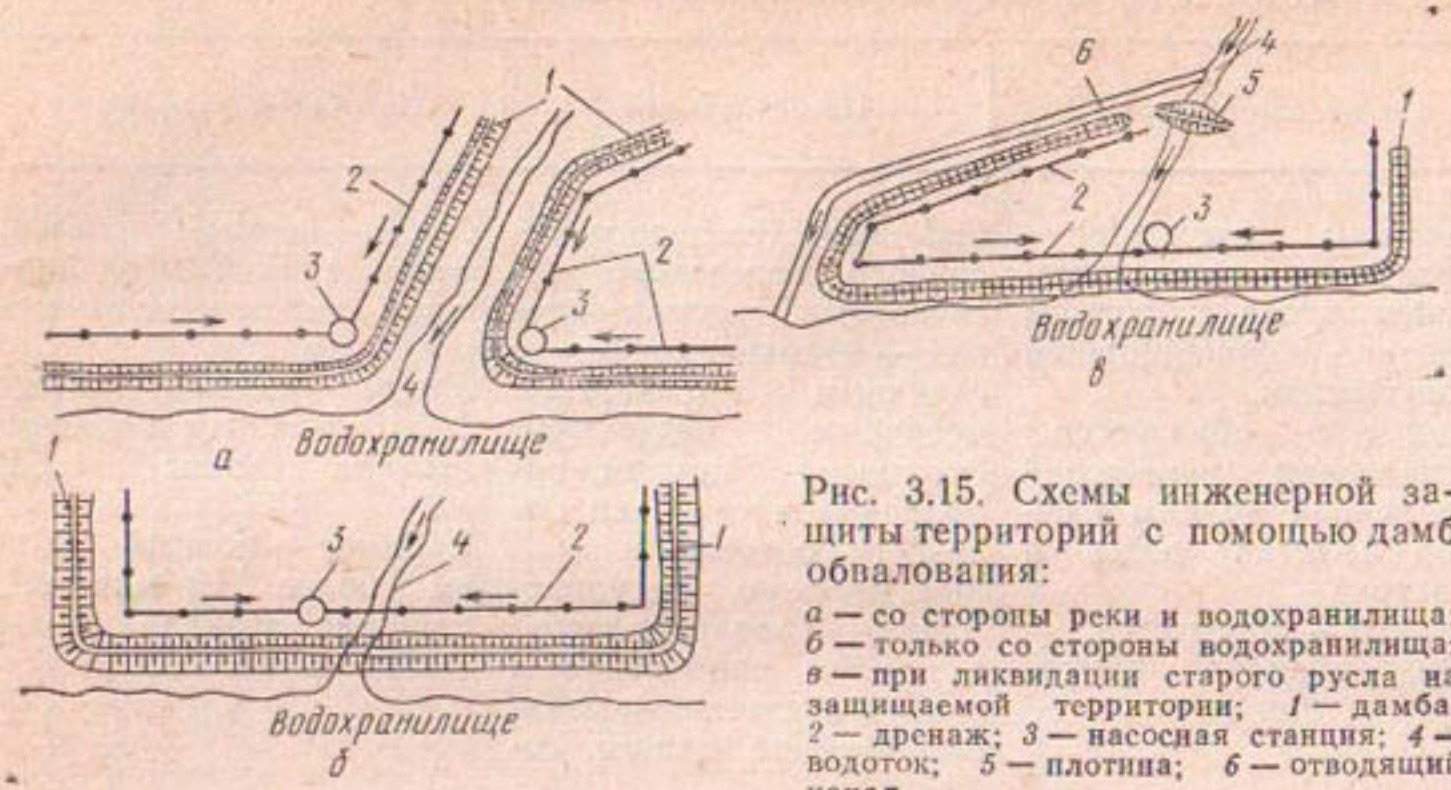


Рис. 3.15. Схемы инженерной защиты территорий с помощью дамб обвалования:

а — со стороны реки и водохранилища; *б* — только со стороны водохранилища; *в* — при ликвидации старого русла на защищаемой территории; *1* — дамба; *2* — дренаж; *3* — насосная станция; *4* — водоток; *5* — плотина; *6* — отводящий канал

сооружений; строительство волноломов; восстановление береговых склонов с креплением и дренированием их; устройство дренажных систем в зоне ожидаемого повышения грунтовых вод; планировка прибрежной зоны дна и берегов водохранилища; локальная защита существующих объектов (гидроизоляция и др.). Наиболее часто встречающийся вид инженерной защиты — обвалование защищаемых территорий системой дамб (рис. 3.15). Как правило, напор на дамбах составляет 2...10 м, что позволяет обжать их профиль с защитой напорного откоса различными типами креплений. Кроме того, инженерная защита включает усиление и подъем устоев мостов, реконструкцию подходов к ним, создание набережных, устройство нагорных каналов для сбора ливневого стока.

Важное защитное мероприятие — борьба с фильтрацией в берегах и дне водохранилища. При необходимости дно защищают пленкой.

3.4.2. ОСОБЕННОСТИ ЭКСПЛУАТАЦИИ МЕЛИОРАТИВНЫХ ВОДОХРАНИЛИЩ

Основной задачей при эксплуатации водохранилища для нужд орошения является обеспечение требуемых заявок на воду.

Эксплуатацию водохранилища разделяют на общеоперативную и техническую.

Общеоперативная эксплуатация заключается в решении вопросов, затрагивающих в целом интересы бассейна реки, которые реализуют государственные органы, управляющие водными ресурсами бассейна реки. Техническую эксплуатацию водохранилища осуществляет непосредственно служба эксплуатации, в задачи которой входит: постоянное оперативное управление техническими устройствами основных сооружений гидроузла в целях создания необходимого запаса воды и подачи ее на орошение; выполнение эксплуатационных планов по наполнению и опорожнению водохранилища; наблюдения и исследования, связанные с эксплуатацией водохранилища; надзор и контроль за состоянием сооружений гидроузла и поддержание их в рабочем состоянии; разработка мероприятий по приведению сооружений гидроузла и чаши водохранилища в надлежащее техническое состояние; выполнение ремонтных работ.

Техническая эксплуатация малых водохранилищ (прудов), обслуживающих колхоз или совхоз, заключается в наполнении и опорожнении пруда; поддержании всех сооружений (плотины, водосбросы, водовыпуски) в рабочем состоянии; учете воды на входе и выходе из пруда; наблюдении за

3.15. Режим наполнения водохранилищ

Год по водности	Сезонного регулирования емкостью, % от среднемноголетнего объема годового стока			Многолетнего регулирования	Наливных
	25	25 ... 50	50		
Многоводный	Наполнение на спаде паводка	Наполнение в два этапа: зимой в объеме, необходимом для промыва, в остальном объеме — на спаде паводка	Наполнение в зависимости от гидрологического прогноза паводка, но с предпаводковой сработкой емкости	Наполняют по мере появления свободного стока в реке. При сработке емкости сохраняют остаточные запасы, величину которых устанавливают при сопоставлении водопотребления и расчетного стока группы маловодных рек. Качество воды регулируют полной сработкой емкости при прогнозе многоводности последующего года	В многоводные годы заполняют максимальный объем до начала сработки водохранилища. В маловодные годы наполняют в любое время с появлением свободного стока в источнике. Период полного наполнения должен быть минимальным для уменьшения потерь воды и сокращения заиления емкости
Средний по водности	Наполнение в период паводка	Наполнение с появлением свободного стока в реке, но с частичной сработкой перед паводком и заполнением в паводок			
Маловодный	Наполнение — постоянно при появлении в реке свободного стока				

состоянием сооружений, гидромеханического оборудования и всех устройств.

Режим эксплуатации водохранилища определяется следующим: отметка уровня воды в водохранилище в нормальных условиях его эксплуатации не должна превышать отметки НПУ, при пропуске расчетного максимального паводка — проектной отметки ФПУ; излишки воды, возникающие в период наполнения емкости водохранилища, сбрасывают в НБ, не допуская превышения уровней воды в нем, допустимых по проекту или диспетчерскому графику.

Режим эксплуатации обеспечивают периодическим наполнением и опорожнением емкости водохранилища. Особенности режима наполнения водохранилищ приведены в таблице 3.15. При заполнении каскада водохранилищ первыми заполняют более глубокие водохранилища с меньшей площадью зеркала воды, из которых потери на испарение и фильтрацию меньше. Мелководные водохранилища заполняют последними, продолжительность хранения воды в них сокращают до минимально возможного.

Темпы наполнения и опорожнения водохранилищ не должны вызывать опасных деформаций тела плотины и каналов, обеспечивающих эти процессы. Ориентировочные скорости наполнения и сработки водохранилищ приведены в таблице 3.16. Для каналов интервал между отдельными попусками или сокращениями поступления не должен превышать двух часов. Единовременное изменение расхода воды для каналов с пропускной способностью до 10 м³/с не должно превышать 10% расхода, с пропускной способностью более 10 м³/с — 5% расхода.

3.16. Ориентировочные скорости наполнения и сработки водохранилища, м/сут

Слои емкости	Наполнение	Сработка
Нижние	Без ограничений	1,0
Средние	0,5...1	0,5
Верхние	0,25...0,5	0,3
Последние 2...3 м	0,05...0,1	0,3

Аварийные ситуации на водохранилище: повышение уровней воды сверх проектных; увеличение выше проектных фильтрационных расходов в дренаже, особенно с появлением признаков суффозии; появление сосредоточенных выходов фильтрационных вод на сухом откосе грунтовой плотины выше дренажных устройств; возникновение сосредоточенного тока воды по контакту тела грунтовой плотины с поверхностями бетонных сооружений со стороны НБ или обходной фильтрации с выходом у подошвы плотины; обрушение и оползание откосов грунтовой плотины, угрожающие целостности всей плотины; разрушение сооружения, входящего в напорный фронт или обеспечивающего эвакуацию паводковых расходов, которое может привести к общей аварии гидроузла.

Для избежания аварийных ситуаций паводок через каскад гидроузлов или отдельный гидроузел пропускают с учетом наполнения водохранилищ и пропускной способности сооружений. При прогнозе интенсивных дождей осуществляют предпаводковую сработку емкости водохранилища. В наливных водохранилищах в период ливней ограничивают пропускную способность подводящего канала, не допуская превышения максимальных уровней воды и возникновения подпоров.

При катастрофических паводках, превышающих расчетную пропускную способность водосбросных сооружений гидроузла, допускается форсировка уровня выше отметки НПУ. Если происходит дальнейшее увеличение расхода, в качестве крайней меры может быть осуществлен временный сброс воды через резервные водосбросы, в обход основных сооружений гидроузла, с разрушением размываемых перемычек, а также в исключительном случае аварийный сброс через прокоп в заранее выбранном месте с приня-

3.17. Мероприятия по поддержанию технического состояния водохранилища

Природоохранные и эксплуатационные	Ремонт			Охрана
	текущий	капитальный	аварийный	
Комплекс организационно-хозяйственных, агролесомелиоративных, агротехнических, лугомелиоративных, гидротехнических и других работ, позволяющих поддерживать требуемую санитарную обстановку и равновесие экологических систем в водоохранной зоне и акватории водохранилища, обеспечивающих качество воды в водохранилище на уровне действующих санитарных норм	Текущий ремонт по устранению дефектов и повреждений в сооружениях без остановки работы системы и, как правило, без снижения уровней воды в водохранилище	Капитальный ремонт по полной или частичной замене износившегося оборудования. Объем, состав и сроки определяет специальная комиссия	Аварийный ремонт при повреждениях и разрушениях от стихийных явлений проводят внепланово в сжатые сроки	Определяется степенью ответственности сооружений: I и II классов — военизированная, III и IV — обычная

тием всех возможных мер против расширения зоны прокопа за счет его саморазмыва. При зимнем режиме эксплуатации водохранилищ глубокая сработка уровня недопустима из-за возможной надвижки льда на сооружение, а также забивки шугой или льдом решеток глубинных водопропускных отверстий. Максимально возможный зимний уровень воды устанавливают с учетом его подпора ледяным покровом. Темпы снижения уровня воды должны быть значительно уменьшены против рекомендуемых в таблице 3.16, чтобы не вызвать разрушения креплений откосов. Поднятие уровня допустимо лишь после начала таяния льда.

Периодически, в зависимости от прогноза температуры воздуха, следует осуществлять обогрев затворов, их пролетных, пазовых, закладных и шарнирных конструкций, не допуская обледенения.

Технически исправное состояние сооружений и водохранилища обеспечивается мероприятиями, приведенными в таблице 3.17.

3.5. ОТСТОЙНИКИ

3.5.1. КЛАССИФИКАЦИЯ. ТРЕБОВАНИЯ К ПРОЕКТИРОВАНИЮ

Классификация. Регулирование режима наносов на оросительных системах, забирающих воду из рек, обильных наносами, отличается многоступенчатостью. Первая ступень — водозаборное сооружение, задерживающее основную массу донных наносов; вторая ступень — отстойники и наносоперехватывающие сооружения (пескогравиеловки, пороги, перехватывающие галереи и т. д.), для удаления прошедших водозабор части донных и избытка взвешенных наносов.

Содержание взвешенных частиц грунта в единице объема воды называют *мутностью* ρ, а предельную массу наносов, перемещаемых потоком во взвешенном состоянии, — *транспортирующей способностью потока* $\rho_т$. Измеряют обе величины в кг/м³.

На оросительной сети скорость потока по мере разветвления каналов уменьшается, соответственно снижается транспортирующая способность и появляется избыток взвешенных наносов. Для их удаления требуется следующая ступень — отстойники на распределительных каналах. Иногда допускается и четвертая ступень осветления — на каналах младшего порядка.

Отстойники на оросительных системах, отстойные бассейны — безнапорные гидротехнические сооружения для осаждения взвешенных наносов. Представляют собой расширенные и углубленные участки каналов длиной от нескольких сот метров до 5...7 км. Классификация отстойников по различным признакам дана в таблице 3.18, а схема компоновочных решений — в таблице 3.19.

Класс отстойника должен соответствовать классу комплекса, в составе которого его устраивают: гидроузла или канала.

Основные требования, предъявляемые к отстойникам оросительных систем: не допускать в каналы наносы, крупность и содержание которых превышает транспортирующую способность потока; обеспечить пропуск на поля мелких (плодородных) фракций наносов; максимально использовать энергию водного потока для очистки осажденных наносов; создать условия для высокопроизводительной работы механизмов, удобного размещения и утилизации извлеченных наносов при механической очистке.

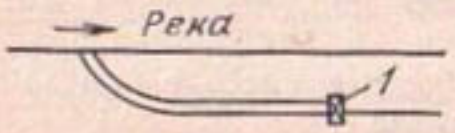
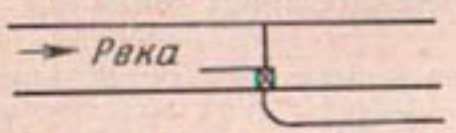
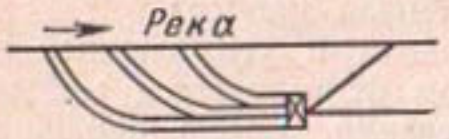
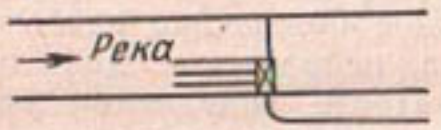
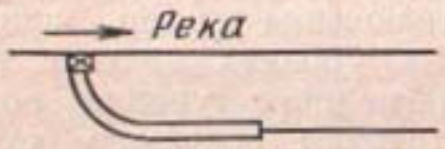
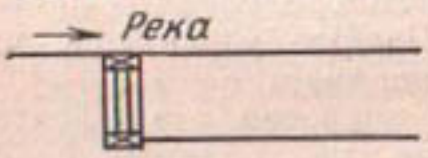
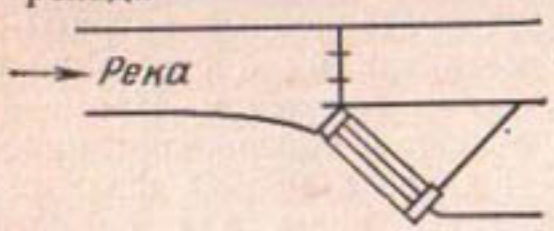
В головных отстойниках осаждается примерно 30...35% поступивших из реки наносов, в основном песчаных фракций с $d \geqslant 0{,}05$ мм. Во внутрисистемных отстойниках и на оросительной сети откладывается 40...50% поступивших наносов, в основном мелкопесчаных и пылеватых фракций с $d = 0{,}5 \ldots 0{,}015$ мм. На орошаемые земли выносится 15...30% (оптимально 20...25%) пылеватых и илистых частиц с $d < 0{,}015$ мм.

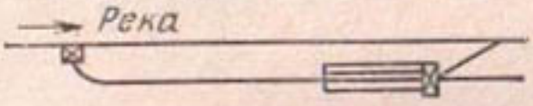
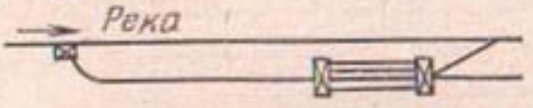
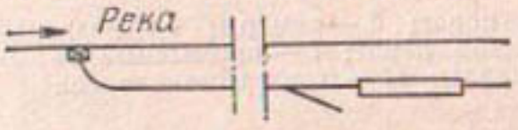
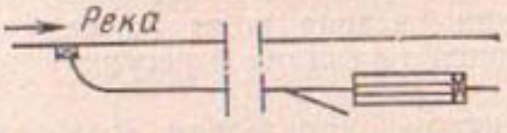
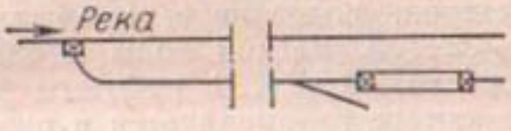
Строительство отстойника не обязательно при мутности потока воды менее 0,5 кг/м³. Необходимость его устройства обосновывают технико-экономическим расчетом.

3.18. Классификация отстойников

Признак классификации	Тип отстойника	Область применения, отличительные признаки
По назначению	Для задержки песчаных и гравелистых наносов (энергетический)	Водозаборные гидроузлы, особенно на горных и предгорных участках рек; деривационные каналы ГЭС. Расчет по d_{min} удаляемых наносов
	Для отстоя мелкопесчаных и илистых наносов (ирригационный)	Оросительные системы равнинных рек. Расчет по допустимой мутности на выходе из отстойника $\rho_{adm,t}$
По местоположению в системе	Русловой	В русле реки в составе водозаборного гидроузла
	Головной	В начале магистрального канала
	Внутрисистемный	В распределительных каналах и их ветвях
По конструкции	Многокамерный	Несколько камер для осаждения наносов с $d \geqslant 0{,}1 \ldots 0{,}25$ мм. Устойчивое осветление потока, удобен и надежен в эксплуатации, поддается автоматизации и телеуправлению. Требует большой площади для размещения и значительного перепада уровней (до 6...7 м), для гидравлического смыва наносов
	Однокамерный	Расширенный и углубленный канал, в котором формируются малые скорости течения, обеспечивающие отстой наносов. Требует повышенного промывного расхода
	Озерный	Естественное понижение вдоль трассы канала, используют для отстоя наносов. После заполнения возвращается в сельскохозяйственное использование
По способу удаления наносов	С гидравлическим промывом	Удаление наносов напорным потоком воды:
	непрерывным	без отключения камер при постоянных уровнях воды в них и слабом подпоре уровня воды в реке; требуют большого суммарного промывного расхода;
	периодическим	поочередный промыв камер отстойника — одна промывается, остальные подают воду в систему. Достигается экономия промывной воды. Лучшее управление процессом осветления
	С механизированной очисткой	Удаление наносов экскаваторами, землесосом на подвижной ферме, земснарядом на плаву. Очистка камер без отключения водоподачи. Ниже стоимость строительства, но больше эксплуатационные затраты
	С комбинированной очисткой	Очистка механизмами в сочетании с гидравлическим промывом. Применяют при большом содержании наносов, в том числе и мелких фракций, при недостатке воды для прямого промыва

3.19. Основные компоновочные схемы отстойников

Тип и схема	Область применения, отличительная особенность
Головные отстойники	
Однокамерный с регулятором на выходе: при бесплотинном водозаборе 	Неустойчивое русло реки. Режим мутности определяется колебанием расходов в реке; при больших — переосветление, при малых — недоосветление потока. Очистка механизмами; при возможности устройства сбросного канала — гидропромыв
при плотинном водозаборе 	Удаление наносов из кармана-отстойника гидропромывом
Многокамерный с регулятором на выходе:	Улучшает степень регулирования мутности путем включения в работу разного числа камер (подводящих каналов) в зависимости от режима мутности и уровней воды в реке
при бесплотинном водозаборе 	При достаточном перепаде гидропромыв без прекращения водоподачи
при плотинном водозаборе 	Удаление наносов гидропромывом
Однокамерный с регулятором на входе: при бесплотинном водозаборе 	Устойчивое русло реки. Степень регулирования мутности не зависит от уровней воды в реке, а определяется расходом воды в канале и начальной мутностью потока. Очистка механическая
Многокамерный с регулятором на входе и выходе:	Регулирование мутности в отстойнике включением разного числа камер, а уровня воды в камерах — с помощью регулятора. Очистка механическая
при бесплотинном водозаборе 	
при плотинном водозаборе или бесплотинном при наличии перепада 	Гидравлический промыв камер с помощью специальных промывных отверстий

Тип и схема	Область применения, отличительная особенность
Многокамерный, удаленный от реки: с регулятором на выходе 	Для промыва используется перепад, образующийся за счет меньшего уклона в канале по сравнению с уклоном реки. До отстойника могут осаждаться наиболее крупные наносы, удаляемые механизмами
с регулятором на входе и выходе 	Улучшены условия регулирования мутности. Уменьшаются промывные расходы за счет резкого снижения уровней воды в отстойнике при промывке
Внутрисистемные отстойники	
Однокамерный нерегулируемый 	Очистка механическая. При наличии местных понижений, достаточной емкости вблизи канала устраивают отстойники с гидропромывом по типу многокамерных, удаленных от реки
Многокамерный с регулятором на выходе 	
Однокамерный с регулятором на входе и выходе 	

Особенности проектирования отстойников. Исходные данные: кривые связи расходов и уровней в реке; гидрологическая характеристика водотока с учетом отбора воды; характеристика твердого стока реки и наносный режим канала на участке отстойника (мутность, фракционный состав наносов); требуемая мутность на выходе из отстойника или предельный минимальный диаметр наносов, подлежащих задержанию; график водоподачи; транспортирующая способность отводящего канала; инженерно-геологические и топографические условия местности.

Расположение отстойника зависит от условий сопряжения его с подводящим и отводящим каналами. Рекомендуется проектировать отстойник соосным с подводящим каналом. При расположении оси отстойника под углом к оси подводящего канала раздельные быки камер удлиняют в сторону ВБ, при этом подводящий участок канала делают прямолинейным, длиной не менее четырех ширин канала по дну.

Отстойник с гидравлическим промывом обычно включают в единый узел с головным водозаборным сооружением. Канал от водоприемника до отстойника проектируют с условием полного транзита наносов, поступающих при водозаборе.

Отстойник состоит: из входной части (аванкамеры), отстойной камеры (одной или нескольких), промывных устройств и выходной части (рис. 3.16).

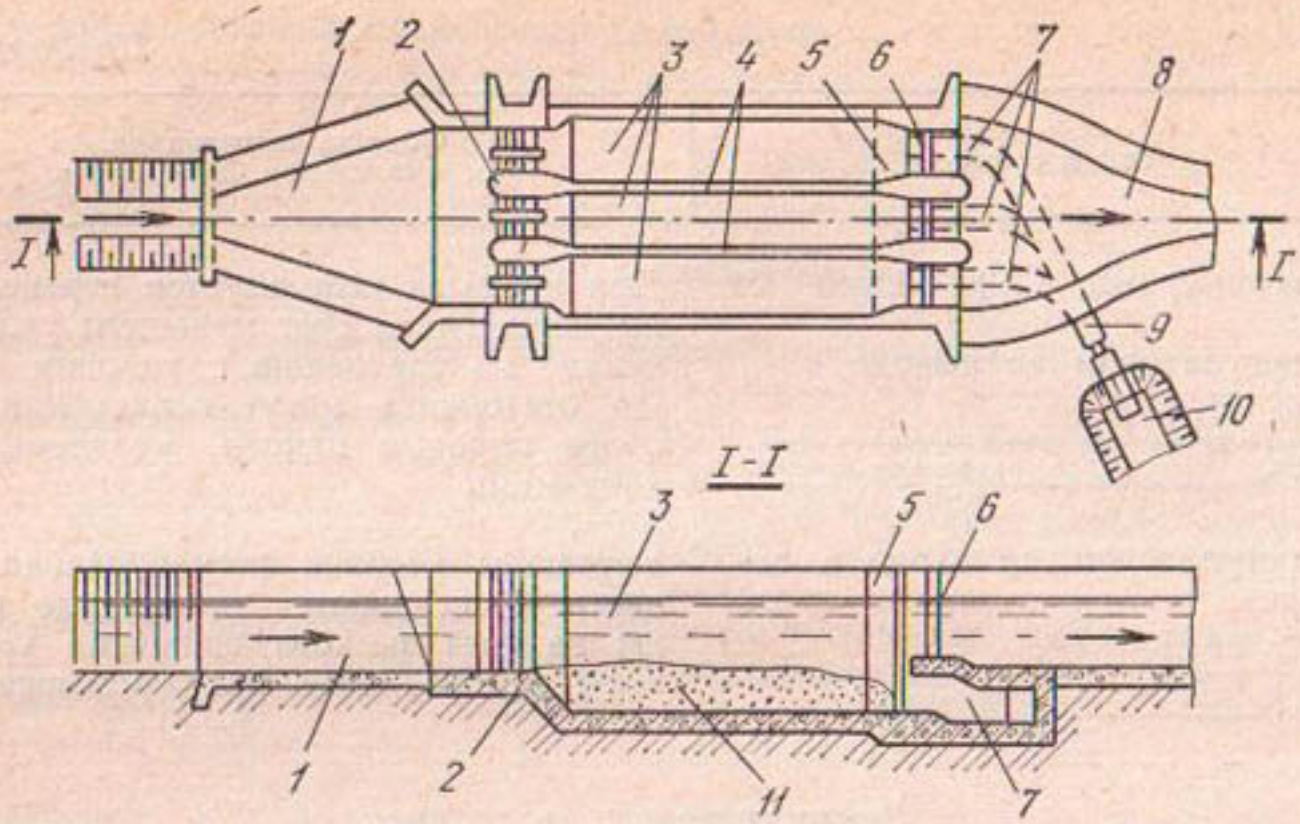


Рис. 3.16. Схема отстойника:

1 — подводящий канал (аванкамера); *2* — входной порог; *3* — камеры; *4* — раздельные стенки; *5* — низовой переходной участок; *6* — выходной порог; *7* — промывные галереи; *8, 9, 10* — магистральный, промывной и сбросной каналы; *11* — отложение наносов

Аванкамеру перед входным порогом отстойника устраивают для обеспечения плавного расширения потока (центральный угол не более 40 ... 45°), необходимого для равномерного распределения расхода воды по камерам. Для улучшения растекания на входе устанавливают решетки и регулирующие затворы.

Число отстойных камер определяют технико-экономическим сравнением вариантов с разным числом камер, так как с увеличением их числа уменьшается промывной расход и улучшается регулирование мутности, но растут объемы работ по устройству раздельных стенок, водосливов, промывных устройств и т. д. Наименьшее число камер — 2 ... 3. Расход воды в одной камере принимают 5 ... 10 м³/с, промывной расход — 0,5 ... 1 рабочего расхода воды в камере. Скорость потока воды в камере рекомендуется в пределах 0,2 ... 0,5 м/с, с учетом отстоя шуги при зимней эксплуатации — не менее 0,5 м/с.

Поперечное сечение камер рекомендуется принимать прямоугольным. Ширина камер B отстойников с гидравлическим промывом не должна превышать $0{,}8\,B_{st}$ (B_{st} — устойчивая ширина потока) для условий промыва. Относительную глубину воды в камере h_m/B принимают 0,4 ... 0,6. Чем меньше глубина воды (обычно 3 ... 5 м), тем лучше осаждаются наносы, но ухудшаются условия промыва, увеличивается ширина отстойника. Длину камер определяют расчетом (см. п. 3.7), исходя из условия обеспечения требуемой степени осветления потока, равной отношению мутностей потока на выходе ρ_t и на входе ρ_u в отстойник ρ_t/ρ_u. Ориентировочно степень осветления потока принимают: для водозабора с расходом более 100 м³/с — до 25%, менее 100 м³/с — до 50%.

Заиление камер допускается на 25 ... 30% средней глубины или объема. Скорость воды при промыве принимают более 2 м/с. Уклон дна для обеспечения смыва ориентировочно равен 0,005 ... 0,02; глубина потока воды — 10 ... 30% глубины при отстое.

Время промыва камеры определяют для критического периода максимального заиления отстойника из расчета обеспечения промыва всех камер за время заиления одной до расчетного слоя. Промывают камеры не более 2 раз в сутки, но не реже одного раза за 2 ... 3 сут при интенсивном движении наносов. Длительность промывок — не более 0,5 ... 1 ч.

Гидравлический промыв отстойников осуществляют с помощью промывных галерей, расположенных в конце камеры при прямом и в начале при обратном промыве. Плановая форма галерей и уклон их дна должны обеспечить работу в безнапорном режиме и без подтопления. Размеры входного отверстия и промывных галерей устанавливают расчетом и проверяют по условиям обеспечения осмотра и ремонта. При недостаточной транспортирующей способности реки и завале ее наносами, поступающими из промывных галерей или нанососбросных трактов, предусматривают их механическое удаление (перемещение, разравнивание и др.) или переходят к устройству отстойника с механической очисткой.

3.5.2. КОНСТРУКЦИИ ОТСТОЙНИКОВ ОРОСИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ

Отстойники с периодическим гидравлическим промывом. Их разделяют на отстойники с прямым, обратным, прямым продольным и поперечным промывом.

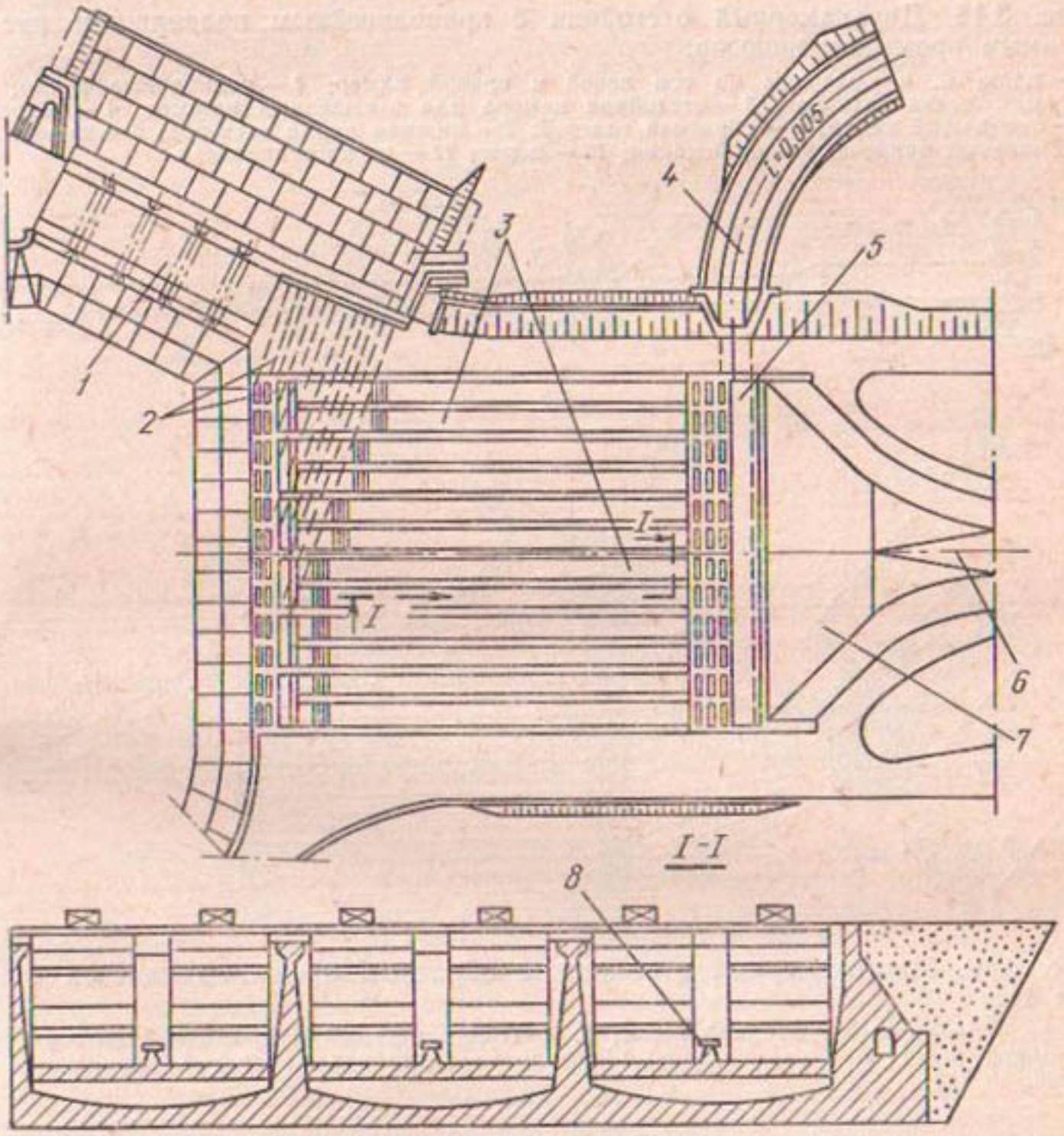


Рис. 3.17. Многокамерный отстойник с прямым периодическим промывом наносов:

1 — водосбросная плотина; *2* — донные промывные галереи (облицовка чугунными плитами); *3* — камеры отстойника; *4* — сбросно-промывной канал; *5* — промывная галерея; *6* — магистральный канал; *7* — отводящая часть; *8* — продольная раздельная стенка камеры

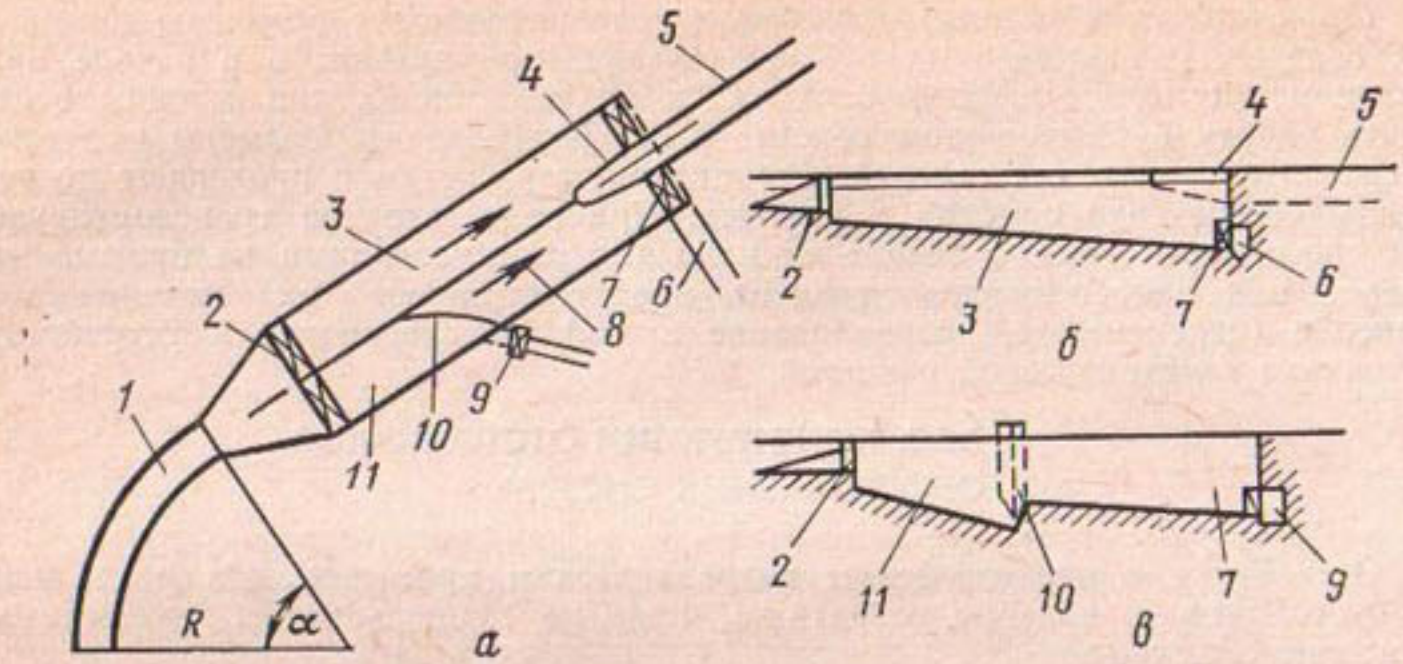
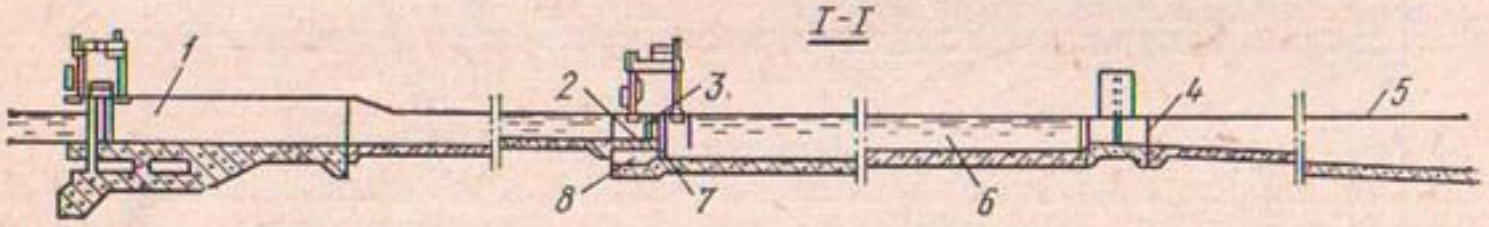


Рис. 3.18. Двухкамерный отстойник с криволинейным подводящим руслом прямым промывом наносов:

а — план; *б, в* — разрезы по оси левой и правой камер; *1* — подводящее русло; *2* — верхняя линия затворов; *3* — отстойная камера для взвешенных наносов; *4* — водослив; *5* — отводящий канал; *6* — сбросная галерея; *7* — нижняя линия затворов; *8* — камера для взвешенных наносов; *9* — промывник; *10* — порог; *11* — пескогравиеловка



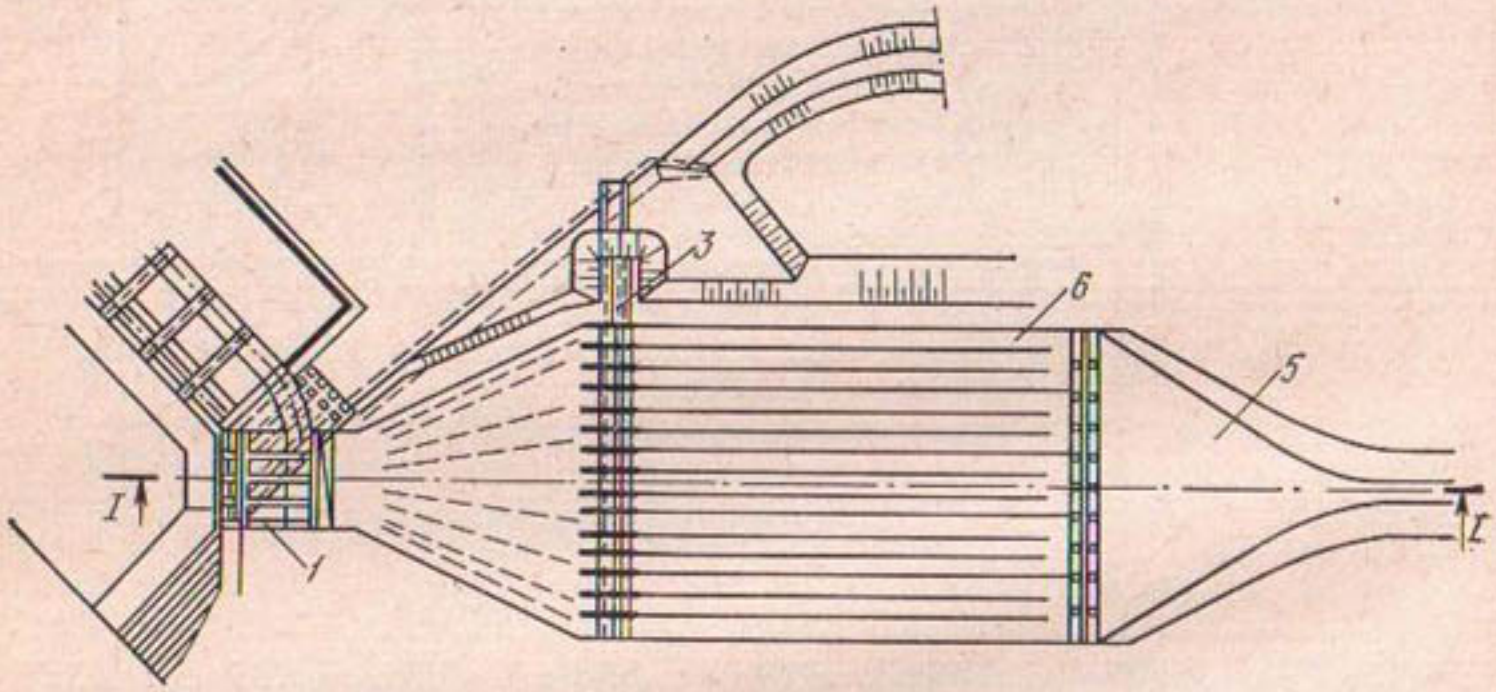


Рис. 3.19. Многокамерный отстойник с обратным промывом наносов (вариант 1):

1 — водоприемник; *2* — входной порог; *3, 7* — поверхностный и промывной затворы; *4* — выходной порог; *5* — соединительный канал; *6* — отстойная камера; *8* — промывная галерея

Отстойник с прямым промывом (рис. 3.17) имеет положительный уклон дна камер, обеспечивающий эффективность промыва, и рассчитан на осаждение наносов крупнее 0,5 ... 0,1 мм, со средними скоростями течения 0,3 ... 0,2 м/с. Крупные донные наносы перехватываются донными промывными галереями прямого типа, заложенными под входными отверстиями отстойника.

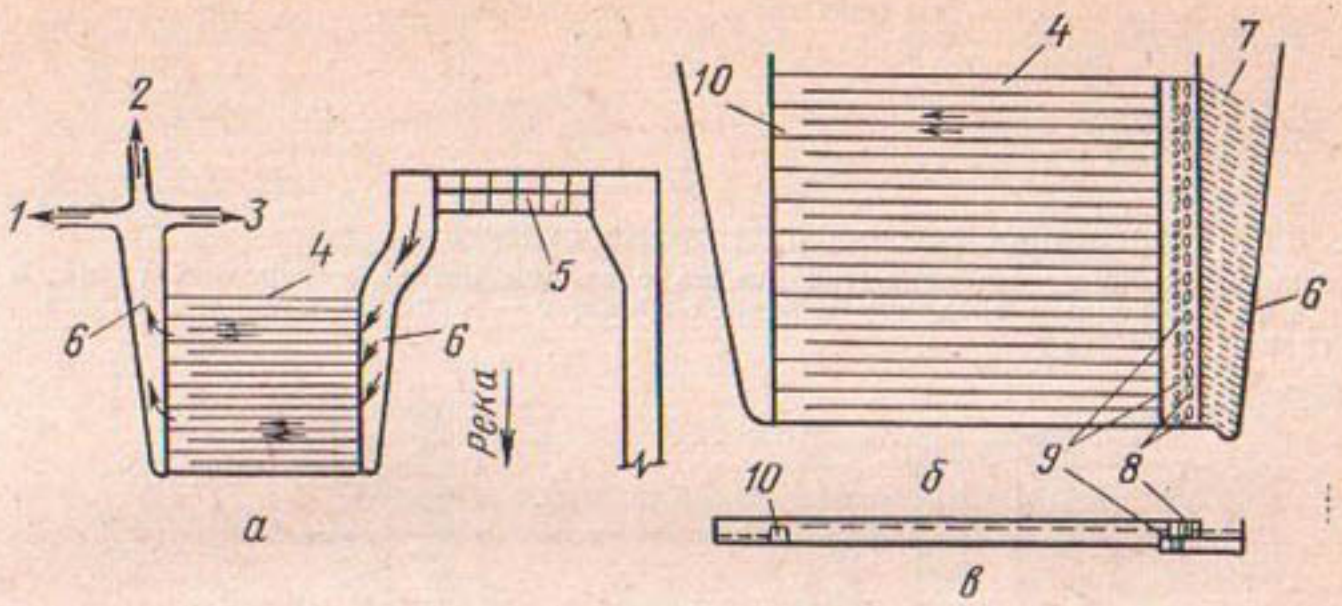


Рис. 3.20. Многокамерный отстойник с обратным промывом наносов (вариант 2):

а — план гидроузла; *б, в* — план и продольный разрез отстойника; *1, 2, 3* — оросительные каналы; *4* — многокамерный отстойник; *5* — водосбросная плотина; *6* — аванкамера; *7* — промывные галереи; *8, 9* — поверхностные и донные затворы; *10* — водослив

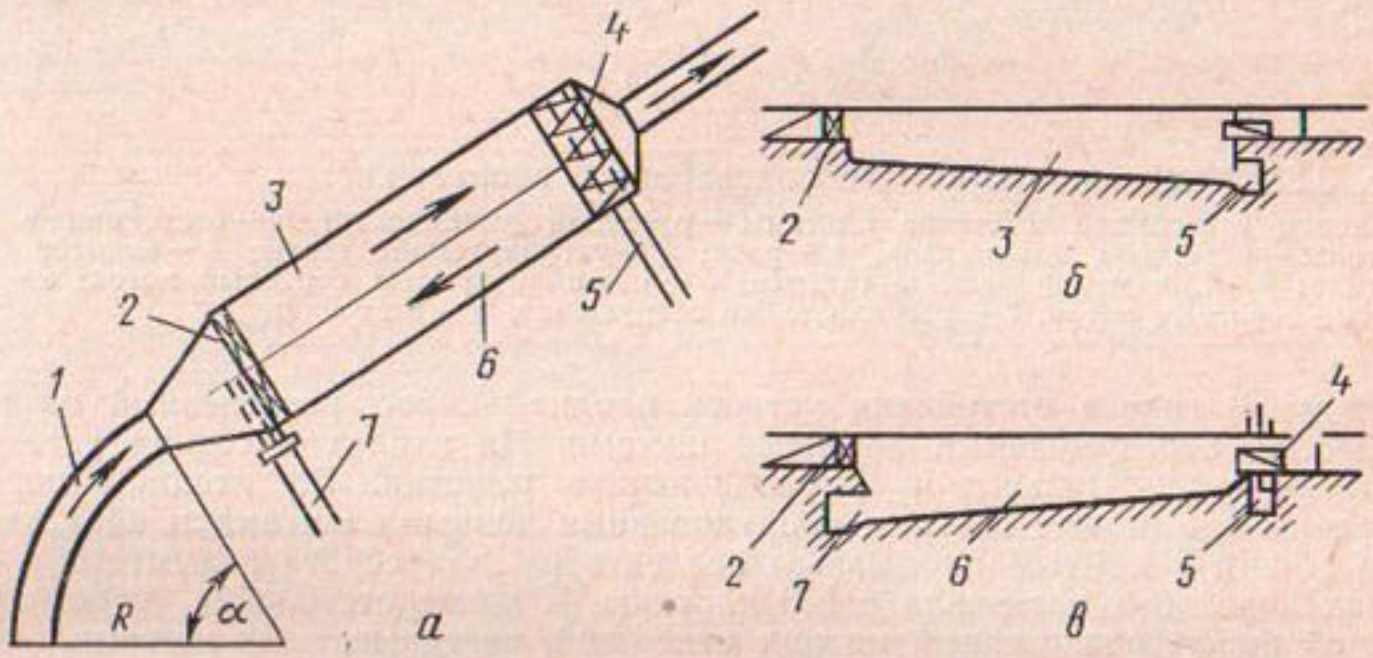


Рис. 3.21. Двухкамерный отстойник с криволинейным подводящим руслом и комбинированным промывом наносов:

а — план; *б, в* — разрезы по оси левой и правой камер; *1* — подводящее русло; *2, 4* — верхняя и нижняя линии затворов; *3* — отстойная камера; *5, 7* — нижняя и верхняя промывные галереи; *6* — камера для донных наносов с обратным промывом

Для горно-предгорных участков рек при большом содержании донных наносов подводящий к отстойнику канал проектируют криволинейным (рис. 3.18) с уклоном больше критического, что обеспечивает поступление донных наносов в правую камеру, а взвешенных в левую.

Отличительные особенности *отстойника с обратным промывом* — обратный (отрицательный) уклон дна камер, устройство промывных галерей во входном пороге отстойника и промыв отложений в направлении, обратном течению воды при работе камеры на заиление. При такой компоновке сокращается длина сбросово-промывных трактов, а следовательно, и потери напора при промыве. Существует две принципиально отличные компоновки: отстойник расположен на одной оси с водоприемником; ось отстойника перпендикулярна оси водоприемника.

В первом случае (рис. 3.19) отстойник сопрягается с водоприемником бетонным переходным участком, разделенным продольными стенками на ряд секций. Дно переходного участка имеет обратный уклон для поддержания равномерной скорости при расширении секций по направлению к входу в от-

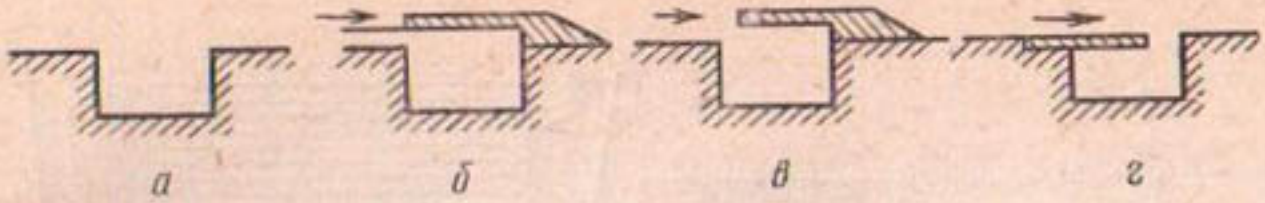


Рис. 3.22. Поперечные сечения промывных галерей:

а — открытая донная; *б* — закрытая донная с входом потока у передней грани; *в* — закрытая со смещенным входом у передней грани; *г* — закрытая с входом потока у задней грани

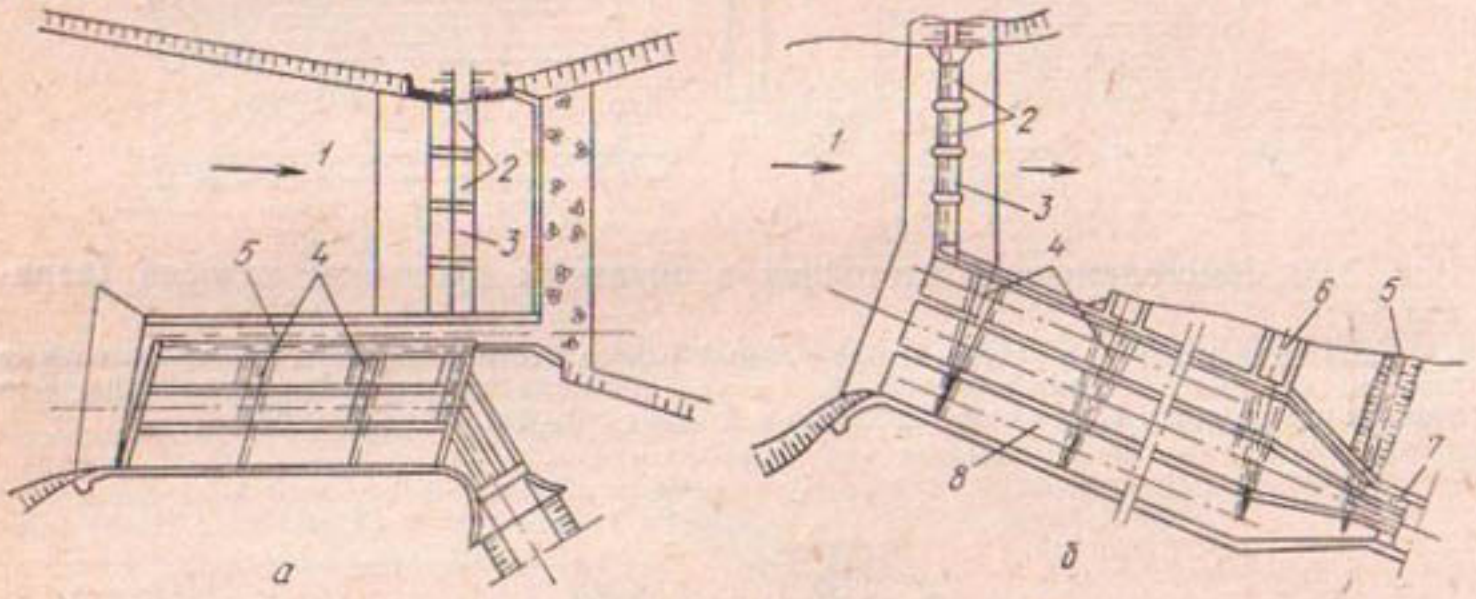


Рис. 3.23. Наносорегулирующее водозаборное сооружение:

а — конец отстойника в створе плотины — русловая компоновка; *б* — отстойник в НБ плотины — береговая компоновка; *1* — река; *2* — регулирующие щиты; *3* — водосбросная плотина; *4* — донные промывные галереи; *5* — общий открытый сбросный лоток; *6* — открытые сбросные лотки; *7* — регулирующее сооружение; *8* — отстойник

стойник. В голове отстойника устроен входной порог, разделенный на ряд отверстий, перекрываемых плоскими щитами. На входах в секции установлены распределительные и выравнивающие решетки. Во входном пороге устроены промывные галереи, оборудованные донными щитами и объединяемые общим закрытым промывным коллектором для сброса размытого в камерах наносного материала в НБ плотины. В конце отстойника устроен выходной порог, разделенный на ряд отверстий, перекрываемых щитами.

Во втором случае (рис. 3.20) отстойник с водоприемником сопряжен аванкамерой переменной ширины с раздельной стенкой, делящей входной участок на две части для увеличения транзитных скоростей потока. Камера отстойника разделена продольной стенкой на две секции для промыва отложений. Перед первой камерой отстойника устроена донная поперечная галерея для перехвата донных наносов с переменным квадратным сечением. Через концевые водосливы осветленная вода поступает в бассейн и далее распределяется между головными регуляторами магистральных каналов. Промывают камеру по секциям с подачей расхода транзитом по одной секции для промыва соседней.

Для горно-предгорной зоны эффективен отстойник с криволинейным подводящим руслом и комбинированным промывом: прямым в левой камере и обратным — в правой (рис. 3.21).

Многокамерный отстойник с прямым продольным и поперечным промывом обеспечивает эффективный промыв камер большой длины при ограниченных промывных расходах. Конструкция отстойника ВНИИГиМ основана на применении донных поперечных галерей с винтовым движением потока, имеющих высокую транспортирующую способность (рис. 3.22), которые располагают в пороге водоприемника или перед входом в отстойник. Для интенсификации процесса промыва и сокращения затрат воды внутри камер устраивают аналогичные донные поперечные галереи, которые перехватывают при промыве донный насыщенный слой потока и тем самым повышают размывающую способность потока на следующем участке отстойника. Эти

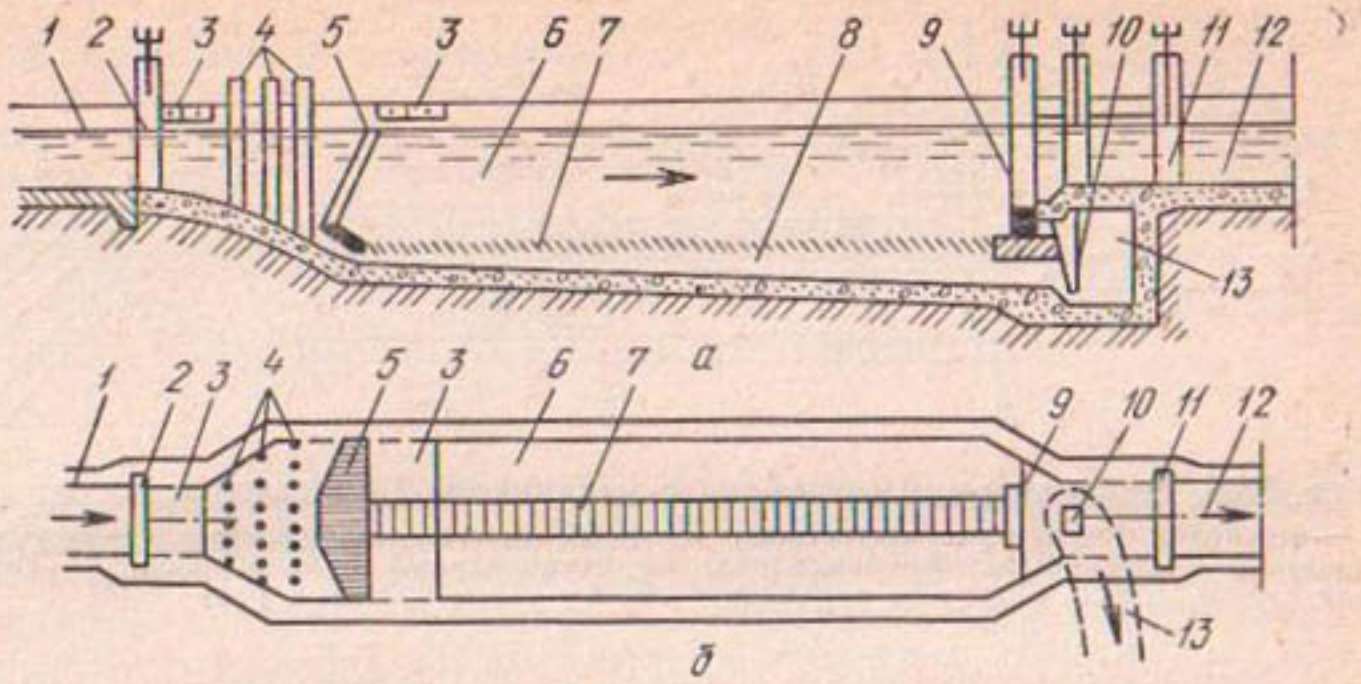


Рис. 3.24. Отстойник с непрерывным промывом:

а — продольный разрез; *б* — план; *1* — подводящий канал; *2* — затвор на входе в отстойник; *3* — служебный мостик; *4* — распределительные решетки; *5* — мелкая сороудерживающая решетка; *6* — камера отстойника; *7* — решетка донной галереи; *8* — донная галерея; *9* — затвор отверстия для сброса шуги; *10* — затвор промывной галереи; *11* — затвор на выходе из камеры отстойника; *12* — магистральный канал; *13* — промывные галереи

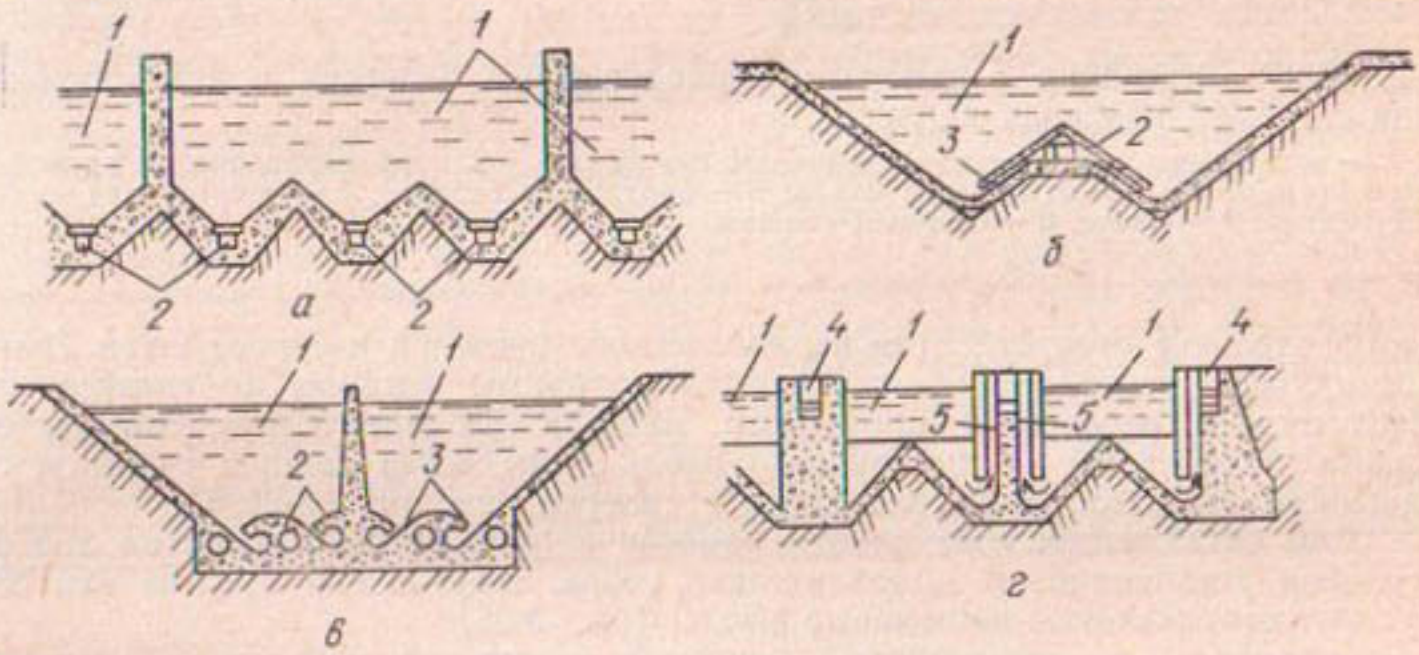


Рис. 3.25. Конструкции отстойников с непрерывным промывом:

а — с ребристым дном; *б*, *в* — с двухсторонними скатами; *г* — с вертикальными промывными шахтами; *1* — камера отстойника; *2* — сборно-промывные галереи; *3* — продольные щелевые отверстия; *4* — отводящие лотки; *5* — вертикальные шахты-колодцы

галереи рассчитывают на сброс 7...10% промывного расхода. Сбросная часть галерей находится на дне отстойника и представляет собой трубу, в конце которой устанавливают затвор для регулирования сбросного расхода. В пороге выходного шлюза устраивают донную концевую галерею, оборудованную затворами, для пропуска 70...100% промывного расхода. Здесь же устраивают верхние щитовые отверстия, регулирующие подачу осветленной воды в магистральный канал.

Компоновка узла сооружений может быть как руслового (рис. 3.23, *а*), так и берегового (рис. 3.23, *б*) типа.

Отстойники непрерывного действия. У однокамерного отстойника непрерывного действия в средней части дна камеры вдоль отстойника устроена сборно-промывная галерея небольшого сечения, перекрытая сверху горизонтальной решеткой (рис. 3.24). На начальном участке камеры имеется торцевое отверстие для подачи воды. В некоторых отстойниках предусматривают

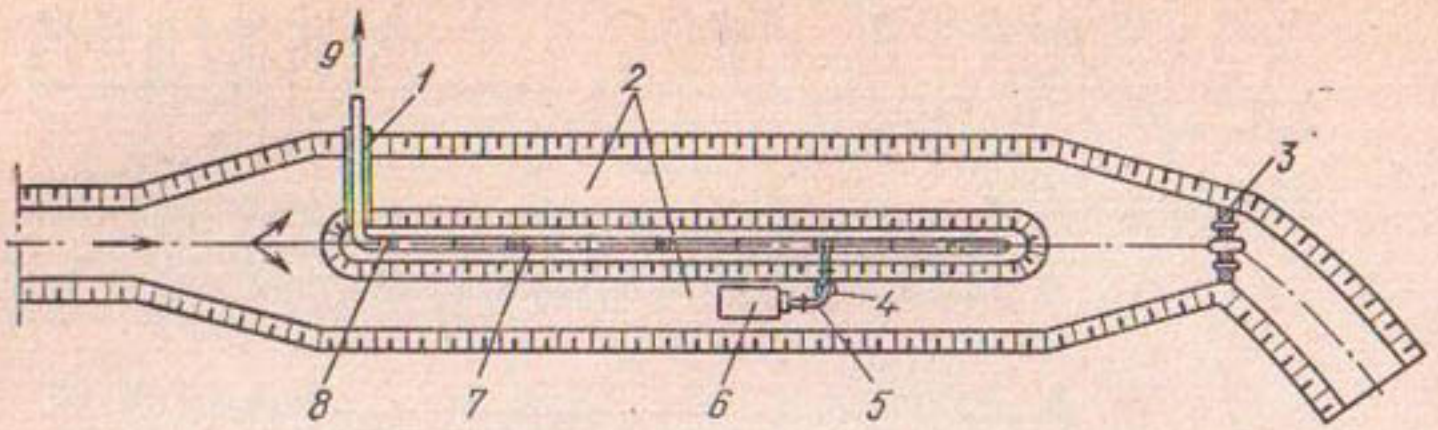


Рис. 3.26. Двухкамерный отстойник с механической очисткой наносов:

1 — эстакада; *2* — камеры отстойника; *3* — регулирующее сооружение; *4* — понтон; *5* — плавучий пульпопровод; *6* — земснаряд; *7* — стационарный пульпопровод; *8* — гидранты для присоединения плавучего пульпопровода; *9* — сброс пульпы в реку

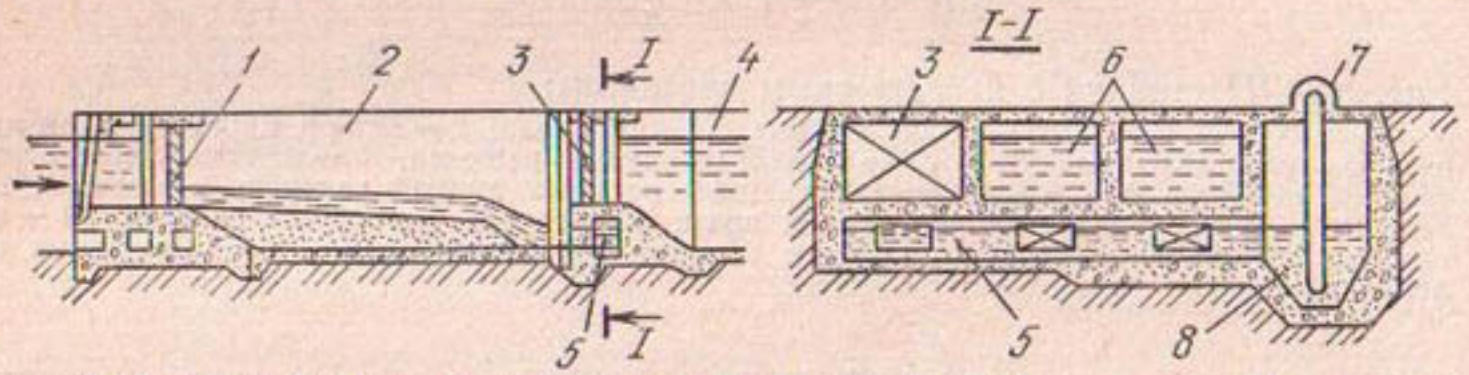


Рис. 3.27. Отстойник с камерами периодического действия и комбинированной системой удаления наносов:

1, 3 — затворы на входном и водосливном порогах; *2* — камера периодически промываемого отстойника; *4* — отводящий канал; *5* — промывная галерея; *6* — работающая камера отстойника; *7* — насос; *8* — сборный колодец

дополнительное отверстие для периодического промыва и сброса шуги. Транспортирующие скорости обеспечиваются напорным потоком в галерее при сравнительно небольшом промывном расходе. Дополнительно снизить его можно устройством асимметричного входа воды через донную решетку, создающего винтовое движение воды в галерее (см. рис. 3.24, *б*).

Для активизации поступления наносов в промывные галереи на дне отстойника устанавливают дополнительно ребра, треугольные призмы или сооружают вертикальные промывные шахты (рис. 3.25).

Отстойники с механической очисткой отложений наносов. Обычно это расширенный и углубленный участок канала, располагаемый непосредственно за регулятором при устойчивом русле реки и на некотором расстоянии (2...4 км) от нее при размываемом русле, или несколько подводящих каналов-отстойников, объединяемых общим головным сооружением, при больших водоотборах на неустойчивом участке реки (см. табл. 3.19). Наносы удаляют землесосом на подвижной ферме или земснарядом на плаву (рис. 3.26).

Ширину отстойника с механической очисткой назначают в пределах устойчивой ширины потока из условия удобства его очистки механизмами. Длина отстойника должна быть не меньше шестикратной его ширины поверху.

Мощность парка землесосов определяют по расчетному объему заиления за год с учетом обеспечения требуемого регулирования режима мутности в отстойнике и равномерной загрузки механизмов. В головных отстойниках с этой целью создают резервные емкости (на 0,5 ... 2 м ниже проектной отметки дна) для размещения осаждаемых наносов при заборе максимальных расходов воды, постоянно очищаемые в течение года.

При образовании больших отвалов грунта в пределах дамб отстойника отвалы разрабатывают повторно специальными гидроустановками, например высоконапорными электрическими земснарядами. Эффективно также рас-

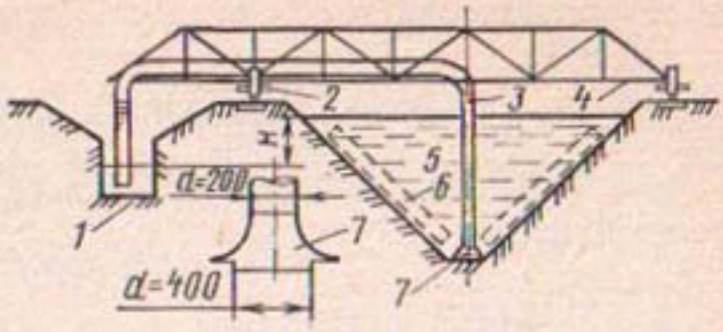


Рис. 3.28. Отстойник с гидромеханической очисткой камеры подвижным сифоном:

1 — лотковый пульповод; *2* — опорные устройства с катками на рельсовом ходу; *3* — сифон из металлической трубы с гибкой вставкой; *4* — подвижный мост; *5* — отстойная камера; *6* — возможное положение ножей-скребков для улучшения перемещения осевших на откосы наносов к сосуду сифона; *7* — всасывающий наконечник. Размеры в мм

средоточение объемов очистки путем устройства внутрисистемных отстойников с механической очисткой.

Отстойники с комбинированной очисткой (рис. 3.27). В таких отстойниках отложения промывают при закрытых затворах в конце камеры пропуском воды из-под щита входного отверстия отстойника. Наносы через промывную галерею смываются в сборный колодец, откуда специальными землесосами их перекачивают в НБ или на площадь отвала грунта.

Отстойник с сифонным рефулером АзНИИГиМ с расходом воды до 8...10 м³/с показан на рисунке 3.28. Рассчитан он на осветление потока 40...50% при наличии мелких взвешенных наносов (0,5...0,01 мм). Разность отметок между уровнем воды в отстойнике и поверхностью земли, как правило, не превышает 2 м.

Очистительная установка состоит из сифона (металлическая труба диаметром 200 мм с толщиной стенок 8 мм), смонтированного на тележке, передвигающейся по рельсам, уложенным по обеим бермам отстойника. Один конец сифона перекинут за борт, а другой — сосун опущен на дно отстойника. Сифонная установка выполнена по профилю сечения отстойника в виде жесткой фермы, а сосун — сплющенной воронки с концевым ножом-скребком.

Озерные отстойники. В качестве внутрисистемных отстойников используют естественные понижения вдоль трассы каналов. При этом мутность регулируют совместными попусками воды в защищаемый канал из отстойника и непосредственно из подводящего канала. Емкость впадины используют по частям последовательным ограждением смежных участков дамбами обвалования, что улучшает условия регулирования выходной мутности и сокращает потери на испарение и фильтрацию. Озерные отстойники не требуют очистки, а при полном заполнении впадины их возвращают хозяйствам для использования.

3.5.3. ГИДРАВЛИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ ОТСТОЙНИКОВ ОРОСИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ

Задача расчета — определение размеров отстойной камеры, объема ее заиления, промывных расходов и сроков проведения гидравлического промыва или механической очистки.

Расчет отстойников для осаждения песчано-гравелистых наносов. Длину камеры L определяют по формуле

$$L = k_s h v_m / w_{\min}, \qquad (3.14)$$

где k_s — коэффициент запаса, равный 1,2...1,5; h — глубина потока, м; v_m — средняя скорость течения в камере при отстаивании, м/с; $w_{\min}$ — минимальная гидравлическая крупность частиц, подлежащих осаждению, м/с. Уклон дна камеры $i \geqslant i_0$, i_0 вычисляют по формуле (6.14) для условий промыва.

Глубину воды на входе в камеру h_u назначают из условия сопряжения с входной частью (обычно 2...6 м), а на выходе $h_t = h_u + iL$.

Дальность выпадения фракций крупнее $d_{\min}$

$$s_t = 1/[w/q_{pr} - (h_t - h_u)/2hL], \qquad (3.15)$$

где w — гидравлическая крупность фракции, мк; q_{pr} — удельный промывной расход, м²/с.

Толщину слоя отложений h_s за интервал времени t находят из соотношений:

для фракций крупнее предельного диаметра частиц d_{min}, подлежащих осаждению,

$$h_s = q\rho_1 t/(g\rho_s s_i); \qquad (3.16)$$

для фракций мельче d_{min}

$$h_s = q\rho_i t\,[2wL/(v_u + v_t) - (h_t - h_u)]/g\rho_s L h_u, \qquad (3.17)$$

где q — удельный расход в камере, м²/с; ρ_s — плотность наносов, кг/м³; ρ_i и ρ_1 — мутность i-й фракции и наименьшей осаждаемой фракции, кг/м³; v_u и v_t — скорости потока воды на входе и выходе из камеры, м/с.

Момент начала промыва определяется критическим интервалом времени T, в конце которого суммарная толщина отложений в начале камеры превысит заданную глубину заиления или s_i для минимальной фракции станет больше L.

Скорость промыва отстойника определяют по формулам

$$v_{pr} = \begin{cases} w\,(h_{pr}/d_m)^{0,5}\,(0,1\rho_{pr})^{0,25} & \text{— для частиц со средней крупностью } d_m < 1 \text{ мм;} \\ 1,2h^{1/6}_{pr}d^{1/3}_5 & \text{— для частиц с } d_m > 1 \text{ мм,} \end{cases}$$

где d_5 — диаметр крупной фракции, составляющей 5% массы отложений, м; ρ_{pr} — мутность потока при промыве, кг/м³; h_{pr} — глубина промыва, определяемая по формуле

$$h_{pr} = 0,9q^{0,85}_{pr}/(d^{0,3}_5 g^{0,42}). \qquad (3.18)$$

Скорость промыва должна быть больше сдвигающей скорости для наиболее крупных частиц наносных отложений, которую ориентировочно определяют по таблице 3.20.

3.20. Сдвигающие скорости наиболее крупных частиц наносных отложений, м/с

Глубина промыва, м	Диаметр частиц, мм				
	10	25	40	75	100
0,4	0,8	1,2	1,5	2,0	2,3
1,0	1,0	1,4	1,8	2,4	2,8
2,0	1,1	1,6	2,1	2,8	3,2

Для многокамерных отстойников время промыва вычисляют по критическому периоду заиления T, исходя из условия, что в режиме промыва находится одна секция

$$t_{pr} \leqslant T/(n-1) + \Delta t, \qquad (3.19)$$

где t_{pr} — время промыва; n — число камер в отстойнике; Δt — время на опорожнение, наполнение камеры.

Расчет отстойника для мелкопесчаных и илистых наносов. Расчет ведут исходя из требуемой степени осветления воды на выходе отстойника, которая определяется разностью мутности потока на входе и выходе.

Длина этих отстойников намного превышает длину отстойников для песчано-гравелистых наносов. Ее определение требует более точного учета наносного режима и структуры турбулентности в потоке.

При однородном составе наносов длину отстойника L и мутность потока в расчетном створе ρ определяют по формулам

$$L = \{q \ln[(\rho_u - \rho_{cr})/(\rho - \rho_{cr})]\}/w;$$
$$\rho = \rho_{cr} + (\rho_u - \rho_{cr}) \exp(-wl/q), \qquad (3.20)$$

где ρ_u — мутность потока на входе; ρ_{cr} — критическая мутность потока в отстойнике, равная транспортирующей способности потока; l — расстояние от входа до расчетного створа отстойника.

При *неоднородном составе наносов* длину отстойника определяют расстоянием, на котором транспортирующая способность потока становится равной заданной. Общий вид формулы транспортирующей способности потока по данным натурных исследований

$$\rho = cv^{\alpha}/(h^{\beta}w^{\gamma}), \tag{3.21}$$

где c — постоянная кривой распределения наносов по фракциям; α, β, γ — показатели степеней по экспериментальным данным. Более часто на практике применяют метод А. Н. Гостунского, согласно которому $c=3{,}3\cdot10^3 n^3$, $\alpha=3$, $\gamma=-1$ (n — шероховатость русла). Разработаны таблицы и номограммы для $\beta=-1{,}15$; $-1{,}05$; $-1{,}1$; $-1{,}2$; $-1{,}3$. Однако, по данным натурных исследований, β меняется от $-0{,}85$ до $-2{,}28$. Замена же одной фракции наносов с соответствующим β другой фракцией дает существенные погрешности в определении выходной мутности.

Пофракционный метод А. Г. Хачатряна, усовершенствованный Х. Ш. Шапиро, дает более точный учет неоднородности распределения наносов. Основные предпосылки расчета: состав наносов делят на четыре фракции, соответствующие данным гидрометеослужбы; распределение наносов по крупности в пределах каждой из этих фракций принято по гиперболической кривой.

За расчетную мутность ρ_0 на входе в головной отстойник принимают среднедекадную мутность потока, полученную по данным многолетних наблюдений над мутностью в районе водозаборного гидроузла.

Максимальную гидравлическую крупность наносов на входе w_{n+1}, зависящую от наибольшей взвешивающей скорости речного потока $u^*_{w,r}$, вычисляют по формуле

$$w_{n+1} = u^*_{w,r} = 0{,}3v_{*r} = 0{,}3\sqrt{gh_m i} = 0{,}94v_r n/h_m^{1/6}, \tag{3.22}$$

где v_{*r}, v_r — динамическая и средняя скорость речного потока, м/с; g — ускорение свободного падения, м/с^2; h_m, i — средняя глубина (м) и уклон свободной поверхности реки; n — коэффициент шероховатости русла реки.

Минимальную гидравлическую крупность наносов w_1 определяют по w_{n+1} подбором

$$\ln w_1 - w_1/w_{n+1} = [\ln w_2 - w_2/w_{n+1} - \rho_1 (\ln w_{n+1} - 1)]/(1 - \rho_1), \tag{3.23}$$

где w_2 — гидравлическая крупность самой мелкой фракции в составе взвешенных наносов.

Общая расчетная мутность на выходе отстойника $\rho(t)$ равна сумме мутностей четырех фракций, на которые разбивают весь диапазон наносов, поступивших из реки,

$$\rho_t = \sum_{i=1}^{4} \rho_{t,i}. \tag{3.24}$$

Расчетную мутность фракции i на выходе отстойника определяют как среднюю для каждой декады за поливной период

$$\rho_{t,i} = E_t \rho_{cr,i}, \tag{3.25}$$

где $\rho_{cr,i}$ — критическая мутность потока для фракции i в канале водопроводящей сети, заиление которого нельзя допускать; E_t — КПД системы до канала, для которого рассчитывают критическую мутность.

Для головных отстойников оросительных систем критическую мутность определяют в канале проводящей сети до внутрисистемных отстойников, при отсутствии последних и для самих внутрисистемных отстойников $\rho_{cr,i}$ — в последнем звене незаиляемых каналов оросительной системы.

Определяющим элементом при расчете критической мутности является транспортирующая способность потока ρ_T.

Для фракции i с гидравлической крупностью w_i

$$\rho_T = \sum_{i=1}^{4} \rho_{Ti}; \qquad \rho_{Ti} = c^*_{Ti}[\ln w_{i+1}/w_i - (w_{i+1} - w_i)/u_w^*], \quad (3.26)$$

где c^*_{Ti} — показатель кривой распределения наносов, $c^*_{Ti} = k_i v^{0,7} u^* w$ (k_i — коэффициент фракционного состава: $k_1 = 12$ для фракции с $d > 0{,}1$ мм, $k_2 = 59$ с $d = 0{,}1 \ldots 0{,}05$ мм, $k_3 = 94$ с $d = 0{,}05 \ldots 0{,}01$ мм, $k_4 = 85$ с $d < 0{,}01$ мм; v — средняя скорость потока в отстойнике); u^*_w — взвешивающая скорость для рассчитываемого объекта ($u^*_{w,c}$ — для канала, $u^*_{w,o}$ — для отстойника), вычисляемая по той же формуле, что и для реки [см. формулу (3.22)].

При уменьшении транспортирующей способности потока (при поступлении воды из реки в канал или отстойник или из канала старшего в канал младшего порядка) в потоке образуется избыточная мутность из более крупных наносов с наименьшей гидравлической крупностью частиц w_{xi}:

$$w_{xi} = (c^*_{Ti} - c_{0i})/(c^*_{Ti}/u_w^* - c_{0i}/w_{n+1}) = (c^*_{Ti} - c_{0i})/(a_{Ti} - a_{0i}), \quad (3.27)$$

где c_{0i} — постоянная кривой распределения по крупности начальной мутности фракции ρ_{0i};

$$c_{0i} = \rho_{0i}/[\ln w_{i+1}/w_i - (w_{i+1} - w_i)/w_{n+1}]. \quad (3.28)$$

При $w_i < w_{xi} < w_{i+1}$ значение w_{xi} вычисляют по формуле (3.27), в остальных случаях $w_{xi} = w_i$. При $c^*_{Ti} < c_{0i}$ и $a_{Ti} > a_{0i}$ $w_{xi} = w_i$; при $c^*_{Ti} < c_{0i}$ и $a_{Ti} < a_{0i}$ $w_{xi} = w_{i+1}$.

Количество наносов фракции i, оставшееся в единице объема потока после осаждения избытка наносов, определяет критическую мутность фракции $\rho_{cr,i}$ и в общем случае при $w_{xi} = w_i$ определяют по зависимости

$$\rho_{cr,i} = c_{0i}[\ln w_{xi}/w_i - (w_{xi} - w_i)/w_{n+1}] + \\ + c^*_{Ti}[\ln w_{i+1}/w_{xi} - (w_{i+1} - w_{xi})/u_b^*]. \quad (3.29)$$

При $w_{xi} \leqslant w_i$ $\rho_{cr,i} = \rho_{Ti}$, которую вычисляют по формуле (3.26).

Для окончательного определения параметров отстойника необходимо знать изменение мутности потока по его длине.

При пофракционном расчете динамики мутности за исходное уравнение принимают баланс мутности в сечении отстойника, отстоящем на расстоянии l_x от его начала

$$\rho_{xi} = \rho_{0i} - [(\rho_{si})_{>w_H} + (\rho_{si})_{<w_H}], \quad (3.30)$$

где ρ_{si} — мутность осевших наносов фракции i; w_H — наибольшая гидравлическая крупность частиц избыточной мутности на расстоянии l_x

$$w_H = vh/l_x = q/l_x. \quad (3.31)$$

Так как $(\rho_{si})_{>w_н} = (\rho_{0i})_{>w_н} - (\rho_{Ti})_{>w_н}$, то из формулы (3.30) получим

$$\rho_{xi} = (\rho_{Ti})_{>w_H} + (\rho_{0i})_{<w_H} - (\rho_{si})_{<w_H}. \qquad (3.32)$$

При $w_H < w^*_{wo}$ и $w_H < w_{i+1}$ из формулы (3.26) имеем

$$(\rho_{Ti})_{>w_H} = c^*_{Ti} \ln \beta/\delta - a_{Ti}(\beta - \delta), \qquad (3.33)$$

где введены обозначения $\beta = \min(u^*_{wo};\ w_{i+1})$; $\delta = \max(w_H,\ w_i,\ w_{xi})$; $a_{Ti} = k_i v^{0,7}$. При $w_H > u_o^*$ и $w_H > w_{i+1}$ $(\rho_{Ti})_{>w_н} = 0$, а

$$(\rho_{0i})_{<w_H} = c_{0i} \ln \beta_0/w_i - a_{0i}(\beta_0 - w_i), \qquad (3.34)$$

где обозначено $a_{0i} = c_{0i}/w_{n+1}$; $\beta_0 = \min(w_H;\ w_{n+1};\ w_{i+1})$;

$$(\rho_{si})_{<w_H} = 1/2w_H \{(\omega_0 - \alpha_0)[2c_{0i} - a_{0i}(\omega_0 + \alpha_0)] -$$

$$- (\omega_T - \alpha_T)[2c_{Ti} - a_{Ti}(\omega_T + \alpha_T)]\} \qquad (3.35)$$

и введены обозначения $\omega_0 = \min(w_{n+1};\ w_{i+1};\ w_H)$; $\alpha_0 = \max(w_i;\ w_x)$; $\omega_T = \min(u^*_{w0};\ w_{i+1};\ w_H)$; $\alpha_T = \max(w_i;\ w_x)$.

Длина отстойника L определится тем расстоянием l_x, на котором общая мутность на выходе, определенная по формуле (3.24), будет равна заданной, ширина отстойника B зависит от типа землесосов, применяемых для очистки (табл. 3.21). Ширину одной камеры в двухкамерном отстойнике с механизированной очисткой принимают из расчета сбрасывания пульпы на один берег.

3.21. Рекомендуемая ширина (м) отстойников с механической очисткой в зависимости от сброса пульпы

Тип землесоса	Производительность землесоса, м³/ч	На один берег	На оба берега
МЗ-11	100	30	60
ЛС-27	250	40	80
МЗ-6	300	50	100

Расчет внутрисистемного отстойника проводят по тем же зависимостям (3.22) ... (3.35), что и для головного отстойника. При этом мутности отдельных фракций на входе во внутрисистемный отстойник

$$\rho_{0\text{II}i} = \rho_{\text{I}i}/E_i, \qquad (3.36)$$

где $\rho_{\text{I}i}$ — мутность фракции i на выходе из головного отстойника, рассчитанная по формуле (3.25); E_i — КПД каналов между головным и внутрисистемным отстойниками.

Наименьшую гидравлическую крупность наносов на входе во внутрисистемный отстойник принимают равной этой же величине для речной мутности w_1 и определяют по изложенному выше способу подбором из формулы (3.23). Наибольшая гидравлическая крупность взвешенных наносов на входе во внутрисистемный отстойник

$$w_{n+1,\text{II}} = u^*_{H\text{I}} \quad \text{при} \quad u^*_{w1} > w_{H\text{I}};$$

$$w_{n+1,\text{II}} = w_{H\text{I}} \quad \text{при} \quad u^*_{w1} < w_{H\text{I}},$$

где u^*_{wI} и w_{HI} — наибольшие взвешивающая скорость, вычисленная по формуле (3.22), и гидравлическая крупность частиц избыточной мутности — по формуле (3.31) в головном отстойнике.

Для облегчения практических расчетов пофракционный метод ВНИИГиМ запрограммирован на языке ФОРТРАН.

Расчет гидравлической промывки отстойника. Количество наносов фракций $\rho_{pr,i}$, которым дополнительно насыщается каждый кубометр промывного расхода, с известным приближением можно рассчитать по формуле

$$\rho_{pr,i} = (\rho_{Ti} - \rho_{0i})\, k_{yi}, \tag{3.37}$$

где k_{yi} — коэффициент уменьшения мутности фракции в отстойнике (степень осветления потока для этой фракции)

$$k_{yi} = (\rho_{0i} - \rho_{ti})/\rho_{0i}. \tag{3.38}$$

Промывной расход Q_{pr} зависит от количества смываемых наносов V_{pr} и принятой продолжительности промывки t_{pr}

$$Q_{pr} = V_{pr} \Big/ (86{,}4 t_{pr} \sum_{i=1}^{4} \rho_{pr,i}). \tag{3.39}$$

Глава 4 ПЛОТИНЫ

4.1. ОБЩАЯ КЛАССИФИКАЦИЯ. ОСОБЕННОСТИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ

Плотина — основной тип водоподпорных сооружений, перегораживающих водоток и его долину для подъема уровня воды, сосредоточения напора в месте расположения сооружения и создания водохранилища. Разность уровней воды верхнего и нижнего бьефов, образованных плотиной, определяет напор H, создаваемый плотиной.

По сроку службы плотины бывают постоянные и временные, *по материалу для возведения* — грунтовые, бетонные или железобетонные, деревянные, тканевые. Сравнительная характеристика плотин из различных материалов дана в таблице 4.1.

В зависимости от последствий аварии, высоты, материала и вида грунта основания плотины делят на четыре класса (см. табл. 1.1).

Проектирование плотин включает два этапа: предварительный — намечают основные параметры с использованием метода аналогов или приближенных зависимостей и расчетный — уточняют параметры с учетом конкретных топографических и климатических условий, устойчивости и прочности, фильтрации в теле плотины, в основании и в обход сооружения, способа производства работ и т. д.

Расчеты на прочность и устойчивость плотин проводят для двух сочетаний нагрузок: основного, включающего постоянные, временные длительные, кратковременные нагрузки и воздействия при нормальной эксплуатации и особого, включающего дополнительно нагрузки при катастрофических условиях.

4.2. ПЛОТИНЫ ИЗ ГРУНТОВЫХ МАТЕРИАЛОВ

4.2.1. КЛАССИФИКАЦИЯ

Грунтовые плотины классифицируют по использованным материалам, способу возведения, конструкциям противофильтрационных устройств в теле и основании плотины (табл. 4.2).

По высоте различают низкие (напор $h<15$ м), средней высоты ($15\text{ м}\leqslant h\leqslant 50$ м) и высокие ($h>50$ м) земляные плотины, а каменно-земляные и каменно-набросные — низкие ($h<20$ м), средней высоты ($20\text{ м}\leqslant h\leqslant 70$ м), высокие ($70\leqslant h\leqslant 150$ м) и сверхвысокие ($h>150$ м).

Классы плотин определяются их высотой, видом грунтов основания и характером последствий при аварии (см. табл. 1.1).

4.2.2. УСЛОВИЯ ПРИМЕНЕНИЯ ГРУНТОВЫХ ПЛОТИН РАЗЛИЧНЫХ ТИПОВ

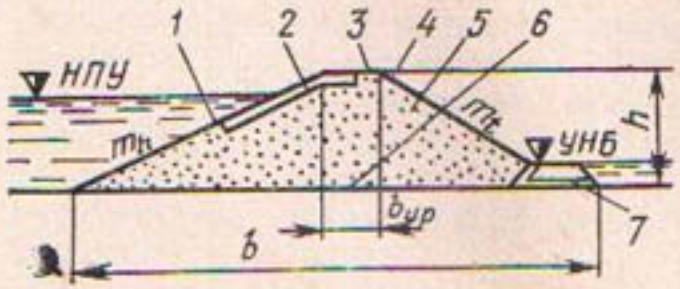
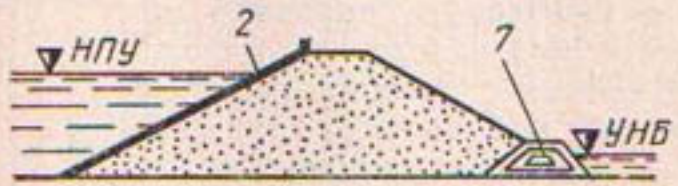
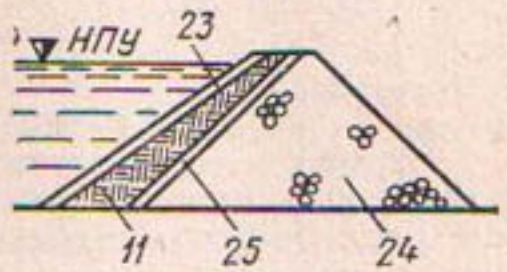
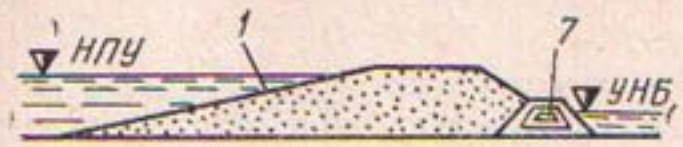
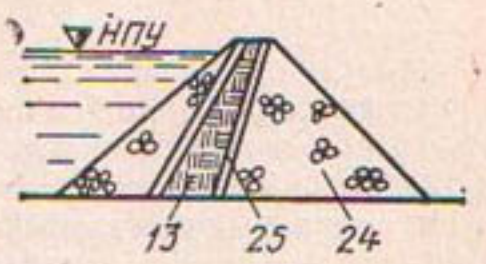
Тип плотины выбирают исходя из инженерно-геологических условий в основании и берегах, гидрологических и климатических условий, напора и расчетных расходов воды, наличия местных строительных материалов, сейсмичности района, условий пропуска строительных расходов и общей схе-

4.1. Характеристика плотин из различных материалов

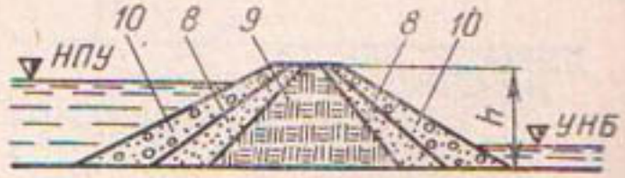
Тип плотины	Область применения	Достоинства	Недостатки
Грунтовые	Гидроузлы различного назначения, гидромелиоративное строительство. Основания скальные и нескальные	Использование практически любых местных строительных материалов (грунтов); комплексная механизация работ при возведении; строительство практически в любых геологических и климатических условиях; простота конструкции; надежность работы в самых тяжелых условиях, в том числе в сейсмических	Не допускают перелива воды через гребень (за редким исключением пропуска паводковых расходов), что требует устройства специальных водосбросных сооружений
Бетонные и железобетонные:	Гидроузлы различного назначения; в большинстве случаев на скальных основаниях — бетонные, на нескальных — железобетонные	Быстрые темпы возведения при высокой механизации строительства; значительно меньший объем тела по сравнению с грунтовыми плотинами; проще и короче эксплуатационные водосбросы; проще пропуск строительных расходов; выше надежность при переливе через плотины; меньше процент аварий	Бóльшие затраты: цемента и металла, доставка которых требует транспортных средств; в определенных условиях эти материалы являются дефицитными и относительно дорогостоящими. Пути снижения стоимости см. с. 175.
гравитационные глухие	На скальных основаниях		
гравитационные водосбросные	На нескальных основаниях		
контрфорсные	На скальных и нескальных основаниях; в суровых климатических условиях; в сейсмических районах	Уменьшение объема бетона и стоимости по сравнению с глухими гравитационными плотинами; уменьшение противодавления в основании; более равномерная эпюра напряжений в основании	Усложнение производства работ; увеличение площади опалубки в 1,5... 2 раза, расхода арматуры и иногда высоких марок бетона в плотинах с плоскими перекрытиями и многоарочных

арочные	На скальных основаниях в горной местности	Экономичны, надежны в эксплуатации; хорошо вписываются в пейзаж	Сложность производства работ, необходимость достаточно прочного и надежного основания; мероприятия по укреплению скалы и противофильтрационные при необходимости
Деревянные	Гидроузлы и мелиоративные системы в районах, богатых лесом	Выполнение строительных работ в течение всего года; относительно простая обработка элементов плотины; несложная механизация и организация работ по их возведению; внедрение типовых конструкций с заводским изготовлением элементов при массовом строительстве с использованием строительного модуля	Краткий срок службы (15...20 лет) из-за гниения древесины в условиях переменного увлажнения. Увеличение срока службы достигают пропиткой смолой или обмазкой антисептиками (креозотовым маслом, песком, нефтью и др.)
Тканевые	Наиболее часто применяют в сооружениях высотой до 5...8 м с напорами до 5 м	Относительно невысокая стоимость конструкций; возможность широкой механизации при возведении, монтаже и демонтаже; сокращение срока возведения	Старение материала под воздействием воздуха, солнечного света, колебания температуры воздуха и других факторов; меньше срок службы; сложность эксплуатации при ледовом режиме рек; недостаточный пока опыт эксплуатации

4.2. Типы плотин из грунтовых материалов

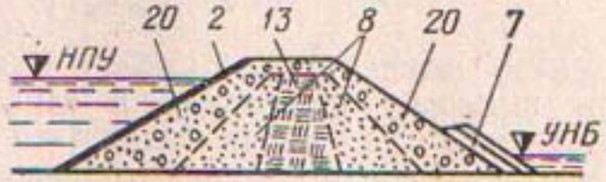
Земляные насыпные	Земляные намывные	Каменно-земляные и каменно-набросные
Отличительные признаки		
Грунты от глинистых до гравийно-галечниковых; отсыпают насухо с уплотнением или в воду	Грунты от глинистых до гравийно-галечниковых; намывают средствами гидромеханизации	Грунты тела — крупнообломочные; противофильтрационные устройства в земляных — из грунтов от глинистых до мелкопесчаных, в набросных — из негрунтовых материалов
Конструктивные признаки		
Однородная  	Однородная: с принудительно формируемыми откосами (двухсторонний намыв с дамбами обвалования на откосах)  	Каменно-земляная: с грунтовым экраном 
	со свободно формируемыми откосами — обоими или только верховым (односторонний намыв с дамбами обвалования на низовом откосе и центральный намыв без дамб обвалования)  	с наклонным ядром 

Неоднородная



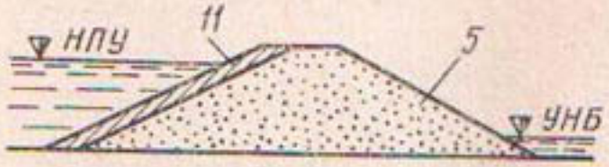
Неоднородная:

с ядром (двухсторонний намыв с дамбами и отстойным прудом в центральной части)

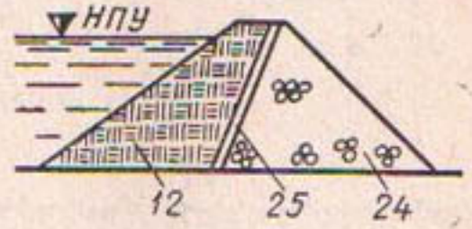


с вертикальным ядром

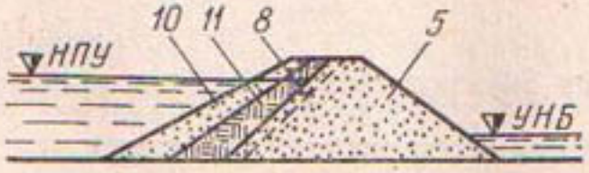
С экраном из негрунтовых материалов



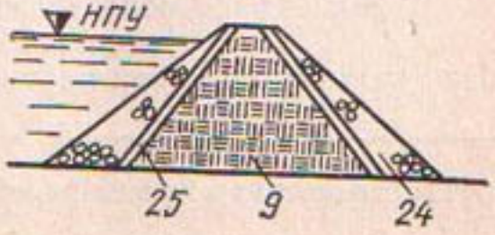
с верховой грунтовой призмой



С грунтовым экраном



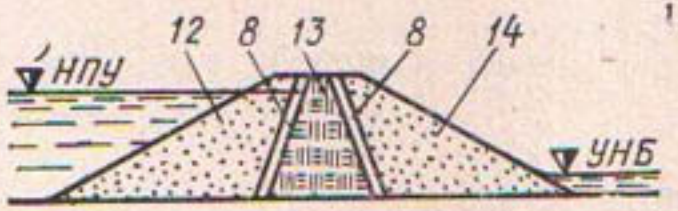
с центральной грунтовой призмой



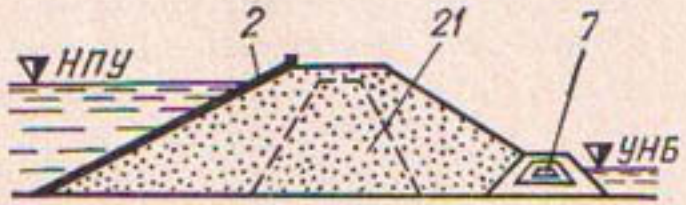
Продолжение

Земляные насыпные	Земляные намывные	Каменно-земляные и каменно-набросные

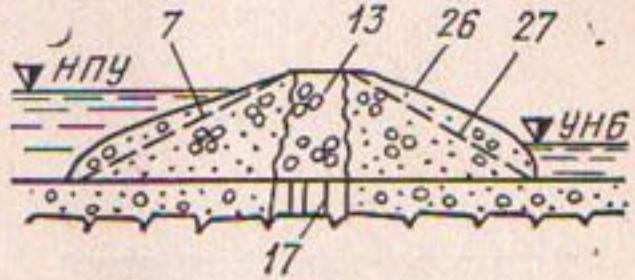
С грунтовым ядром (вертикальным или наклонным)



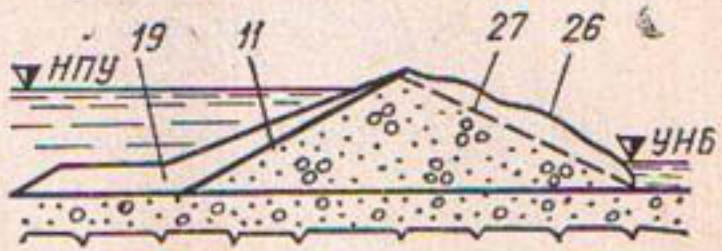
с центральной зоной (намыв тот же, что и при устройстве ядра)



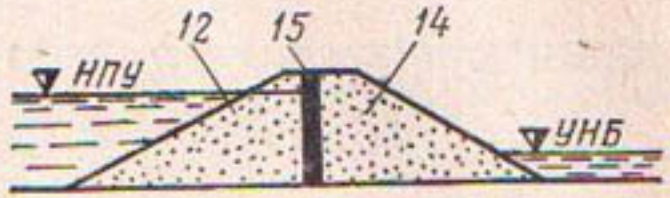
Взрывонабросная — возводимая направленным взрывом:
с инъекционной диафрагмой



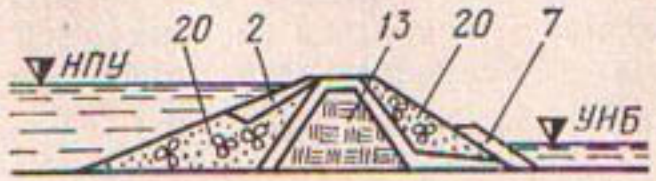
с экраном



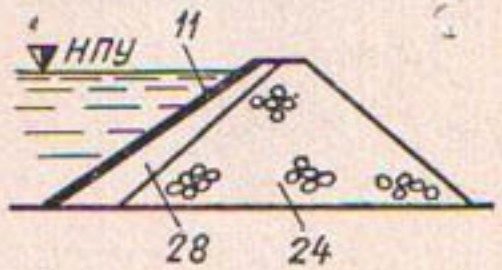
С негрунтовой диафрагмой (стенкой, шпунтом)



Комбинированная:
с насыпным ядром из глинистого грунта и намывными боковыми зонами (двухсторонний намыв без пруда)

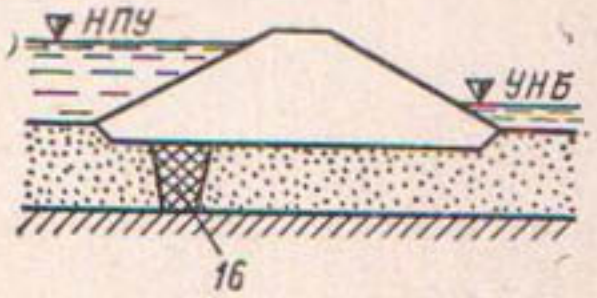


Каменно-набросная:
с экраном из негрунтовых материалов

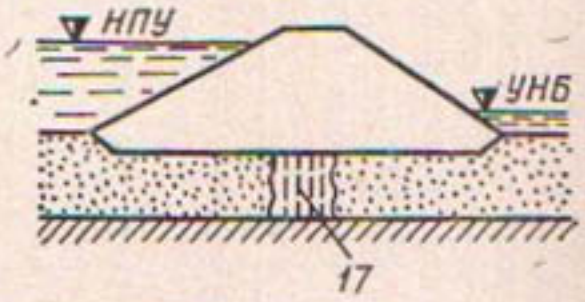


С противофильтрационными устройствами в основании в виде:

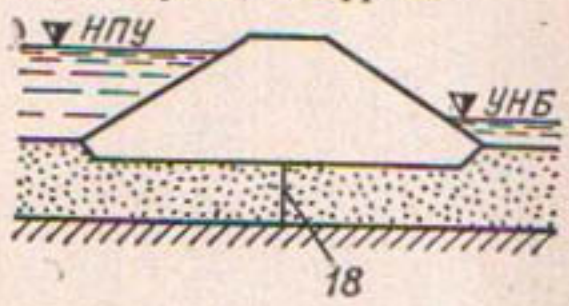
замка



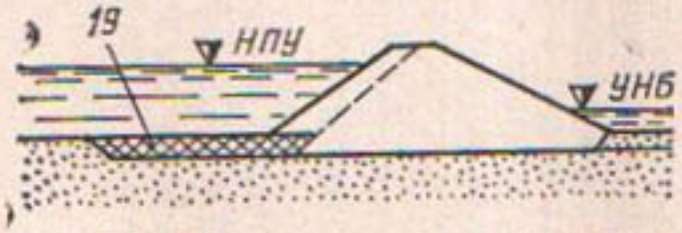
инъекционной завесы



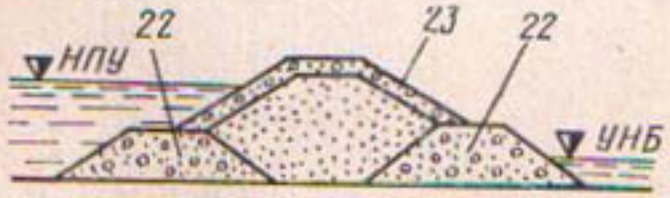
стенки, шпунта, диафрагмы



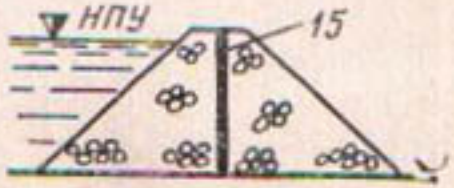
понура



с насыпными банкетами из горной массы и намывной однородной центральной зоной (двухсторонний намыв без пруда)



с диафрагмой из негрунтовых материалов



Примечание. *1, 4* — верховой и низовой откосы; *2* — крепление откоса; *3* — гребень; *5* — тело плотины; *6* — подошва; *7* — дренаж; *8* — переходные зоны; *9* — центральная призма; *10* — защитный слой; *11* — экран; *12, 14* — верховая и низовая призмы; *13* — ядро; *15* — диафрагма; *16* — замок; *17* — инъекционная завеса; *18* — шпунт; *19* — понур; *20, 21* — боковая и центральная (мелкопесчаная) зоны; *22* — боковые насыпные или каменно-набросные призмы (банкеты); *23* — защитная пригрузка; *24* — крупнообломочный грунт; *25* — обратный фильтр; *26* — контур после взрыва; *27* — расчетный профиль; *28* — кладка под экраном; $b_{гр}$ — ширина плотины по гребню; b — ширина подошвы плотины; h — высота плотины; m_h, m_t — заложение верхового и низового откосов соответственно.

мы организации производства работ, имеющейся строительной техники, сроков ввода сооружения в эксплуатацию и пр.

Грунтовые плотины можно возводить как на скальных, так и нескальных грунтах основания.

Качество скального основания оценивают по наличию крупных трещин, незаполненных или заполненных легко вымываемыми мелкими фракциями грунта, тектонических нарушений (сбросов и сдвигов), ослабленных зон, которые могут разрушаться при насыщении их водой, а *нескального основания* — по наличию суффозионных грунтов и грунтов, консолидация которых может привести к возникновению избыточного порового давления.

На нескальных грунтах основания, содержащих водорастворимые включения хлоридных солей более 5% по массе, сульфатных или сульфатно-хлоридных более 10% по массе, плотины возводят только при проведении специальных исследований скорости рассоления и выщелачивания и их влияния на устойчивость и деформируемость сооружений. В этих случаях предусматривают меры, предотвращающие выщелачивание грунтов основания (устройство понура, зуба, завесы).

Плотины высотой до 20 м можно возводить на торфяном или заторфованном основании при степени разложения торфа не менее 50%. Плотины большей высоты в указанных условиях, а также плотины на илистых грунтах возводят только при соответствующем обосновании.

В зависимости от грунтов основания предпочтительны следующие виды земляных, каменно-земляных и каменно-набросных плотин.

Грунты основания	Вид плотины
Малосжимаемые (гравийно-галечниковые, песчаные, моренные, плотные, глинистые и суглинистые грунты)	Земляные насыпные: однородные, с ядром, с экраном грунтовым или из полимерных материалов
Сильно сжимаемые	Земляные насыпные: однородные, с ядром
Скальные, полускальные или плотные аллювиальные грунты	Каменно-земляные: с экраном при достаточно прочном камне для отсыпки в тело плотины и наличии грунта для экрана с высокой фильтрационной и сдвиговой прочностью; с ядром при низкопрочном камне и грунтах с пониженной сдвиговой прочностью для ядра; взрывонабросные
Скальные, полускальные грунты при отсутствии требуемых грунтов для ядра или экрана	Каменно-набросные плотины с негрунтовыми противофильтрационными элементами

При возведении насыпных плотин в две очереди предпочтительны однородные плотины, плотины с малопроницаемой верховой призмой или с экраном. Плотины с ядром экономически выгоднее плотин с экраном. Однако при дождливом или суровом климате лучше устраивать экраны, так как при неблагоприятных условиях укладку грунта в экран можно прекратить без остановки работ по сооружению упорной призмы.

Рекомендуемые области применения различных типов намывных плотин приведены ниже.

Однородные с принудительным формированием откоса	Плотины высотой до 50 м при наличии требуемых карьерных грунтов
Однородные со свободно формируемым откосом	Плотины до 10...15 м на слабых грунтах, в случае когда пологий верховой откос без крепления экономически выгоден; при намыве под воду

Неоднородные	При необходимости уменьшения фильтрационного расхода воды
Однородные и неоднородные с боковыми каменно-набросными призмами	При использовании высоких перемычек или камня из полезных выемок котлованов
Аналогичные с пригрузкой откосов	В сейсмических районах

4.2.3. ТРЕБОВАНИЯ К ГРУНТОВЫМ МАТЕРИАЛАМ ДЛЯ ВОЗВЕДЕНИЯ ПЛОТИН

Для земляных насыпных плотин используют все виды грунтов, за исключением содержащих водорастворимые включения хлоридных солей более 5%, сульфатных или сульфатно-хлоридных солей более 10% по массе, а также грунтов, содержащих неразложившиеся органические вещества (остатки растений) более 5% по массе или полностью разложившиеся органические вещества, находящиеся в аморфном состоянии, более 8% по массе.

Для возведения насыпных плотин или их элементов рекомендуют следующий состав грунтов.

Тип плотины и ее элементы	Рекомендуемые грунты
Однородные плотины низкие и средней высоты	Суглинки, супеси, песчаные грунты, обладающие требуемой фильтрационной прочностью и водопроницаемостью. Тяжелые глинистые и илистые грунты допускаются лишь при соответствующем технико-экономическом обосновании
Низовые части профиля насыпных плотин всех видов	Песчаные, гравийно-галечниковые и крупнообломочные
Грунтовые противофильтрационные устройства (экраны, ядра, понуры, зубья)	Грунты с коэффициентом фильтрации $k \leqslant 10^{-6}$ м/с: глинистые грунты (наиболее пригодны) с числом пластичности $I_p \geqslant 0{,}05$ (при обосновании $I_p \geqslant 0{,}03$); торф со степенью разложения $\geqslant 50\%$ (для экранов и понуров плотин III и IV классов высотой до 20 м); искусственные грунтовые смеси, целесообразность применения которых обосновывают технико-экономическим расчетом
Обратные фильтры дренажей, переходные зоны и крепление откосов	Песчаные, гравийно-галечниковые грунты и дробленые скальные породы, обладающие достаточной прочностью, морозостойкостью, неразмокаемостью в воде, не содержащие водорастворимых включений
Плотины, возводимые отсыпкой грунта в воду	Любые грунты, обладающие требуемыми прочностными и фильтрационными свойствами. Предпочтительны моренные грунты и лессовидные суглинки. При использовании глинистых грунтов рекомендуют обеспечивать 20% мелких комьев ($d < 0{,}1$ м), размокающих быстрее и омоноличивающих всю массу грунта

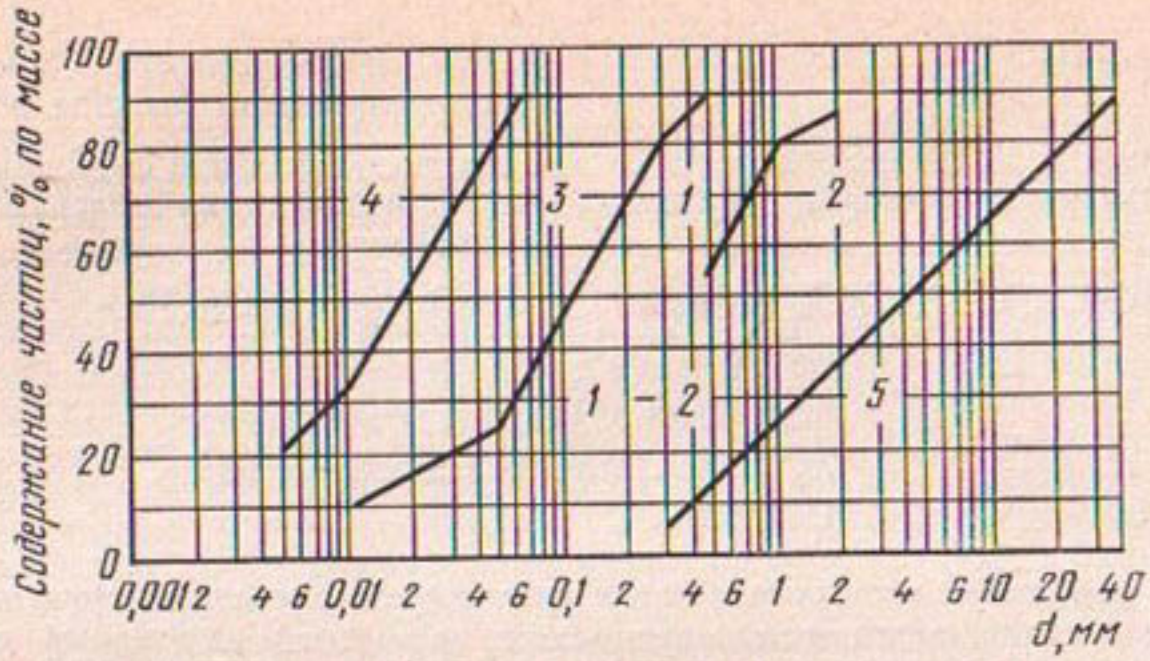


Рис. 4.1. Группы грунтов, используемых для намыва плотин:

1 — песчаные; *2* — песчаные и гравийные; *3* — супеси; *4* — суглинки; *5* — гравийные и галечниковые грунты

Для намывных плотин пригодность карьерного грунта зависит от его гранулометрического состава.

Предварительную оценку пригодности грунта для намыва плотин проводят по графикам, представленным на рисунке 4.1.

Предпочтительны при намыве однородных плотин песчаные грунты группы 1; неоднородных плотин с мелкопесчаным ядром или центральной зоной — песчаные и гравийные грунты группы 2; ядер плотин — грунты группы 2, а также супеси (группа 3) и суглинки (группа 4) при соответствующем обосновании. Намытый грунт не должен содержать более 20% глинистых частиц ($d \leqslant 0{,}005$ мм). Гравийно-галечниковые грунты (группа 5) используют для намыва упорных призм и боковых зон неоднородных плотин при соответствующем обосновании.

В карьерных грунтах допускается содержание органических и водорастворимых примесей при условии, что их остаток в намытом грунте не будет превышать пределов, допустимых для насыпных плотин. Смеси грунтов из различных карьеров, а также глину с ее принудительным обезвоживанием в теле плотины используют только при технико-экономическом обосновании.

Для каменно-земляных и каменно-набросных плотин применяют камень различных пород. В теле плотины может быть использован практически любой крупнообломочный материал при соответствующем его уплотнении и зонировании. Для наброски требуется крупный и прочный камень, лучше рваный, с соотношением максимального и минимального размеров не более трех-четырех. В последние годы плотины возводят в основном отсыпкой камня тонкими слоями (до 2,5 м) с механическим уплотнением. Крупность материала при этом — не более 0,75 толщины отсыпаемого слоя.

4.2.4. КОНСТРУКЦИИ ГРУНТОВЫХ ПЛОТИН

Гребень плотины. Ширину гребня принимают не менее 4,5 м в зависимости от условий производства работ и эксплуатации. Если по гребню проложена дорога, то ширина его и тип покрытия проезжей части дороги зависят от ее категории. Покрытие укладывают на подготовку из песчаного или песчано-гравийного грунта. Глинистые грунты тела плотины в зоне гребня защищают слоем из несвязных грунтов толщиной не менее расчетной глубины промерзания. В поперечном направлении проезжей части придают уклон 1,5...4%; уклон обочин на 1...3% больше, по краям которых устанавливают сигнальные столбики или низкие стенки.

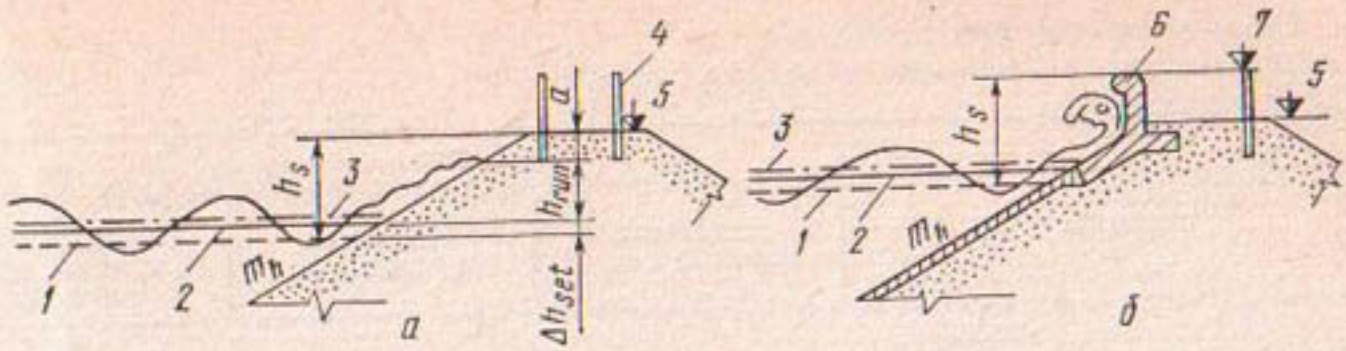


Рис. 4.2. Схема к определению отметки гребня плотины:

а — без парапета; *б* — с парапетом; *1* — расчетный статический уровень; *2* — уровень воды при ветровом нагоне; *3* — средняя волновая линия; *4* — сквозные ограждения на гребне; *5* — отметка гребня; *6* — парапет; *7* — отметка верха парапета

Возвышение h_s гребня плотины над расчетным уровнем воды в водохранилище (рис. 4.2) определяют по формуле

$$h_s = \Delta h_{set} + h_{run\ 1\%} + a, \qquad (4.1)$$

где Δh_{set} — высота ветрового нагона; $h_{run1\%}$ — высота наката ветровой волны 1%-ной обеспеченности; a — запас по высоте плотины. Значения Δh_{set} и $h_{run\ 1\%}$ определяют по СНиП 2.06.04—82 (см. гл. 2). Конструктивный запас a принимают как большее из значений 0,5 м или $0{,}1h_1\%$ ($h_1\%$ — высота волны 1%-ной вероятности превышения). Расчет по формуле (4.1) проводят для двух уровней — НПУ и ФПУ. В качестве расчетной принимают большую отметку гребня.

Если на гребне плотины предусматривают парапет, то отметку последнего определяют как отметку гребня плотины (рис. 4.2, *б*). При этом отметка гребня насыпи должна быть не менее чем на 0,3 м выше НПУ и не ниже ФПУ. Высота парапета обычно составляет 1,2 ... 1,5 м.

Определяя h_s при НПУ, скорость ветра v_w принимают 1%-ной обеспеченности, наблюдаемой в течение года, а при ФПУ — 50%-ной обеспеченности, наблюдаемой в период форсировки уровня.

Заложение откосов. У земляных плотин на достаточно прочных грунтах основания ориентировочно заложение откосов можно принять по таблице 4.3; намывных плотин средней высоты — по таблице 4,4; каменно-земляных и каменно-набросных — по таблице 4.5.

4.3. Средние заложения откосов земляных плотин

Высота плотины, м				
5	5 ... 10	10 ... 15	15 ... 50	50
Верховой откос m_h				
2,0...2,5	2,25...2,75	2,5...3,0	3,0...4,0	4,0...5,0
Низовой откос m_l				
1,75...2,00	1,75...2,25	2,0...2,5	2,5...4,0	4,0...4,5

Заложение откосов плотин средней высоты и высоких, как правило, изменяют по высоте, делая откос более крутым к гребню и более пологим к подошве.

Бермы. Их обычно предусматривают на верховом откосе для упора крепления, а на низовом — для сбора и отвода дождевого стока и талых вод. Бермы шириной 1 ... 2 м на низовых откосах располагают через 10 ... 15 м (иногда до 20 м) по высоте плотины. Если по берме предусмотрен служебный проезд, ее ширина должна быть не менее 3 м. На каменно-земляных и каменных плотинах бермы на низовом откосе предусматривают для прокладки дорог или с целью увеличения среднего заложения откоса.

4.4. Средние заложения верхового m_h и низового m_l откосов намывных плотин

Тип плотины	Грунты основания		
	скальные, плотные глины	песчаные, супесчаные	старичные отложения, торф, ил
Неоднородная гравийно-песчаная с ядром	3...4	—	—
Однородная песчаная	—	3,5...5	5...8

4.5. Средние заложения откосов каменно-земляных и каменно-набросных плотин

Тип плотины				
гравийно-(щебенисто) земляная		каменно-земляная		каменно-набросная (каменная)
с экраном	с ядром	с экраном	с ядром	
Верховой откос m_h				
2,5...3,5	1,5...2	2...3	1,5...2	1,2...1,3
Низовой откос m_l				
2...3	2...2,5	1,3...2	1,3..2	1,3...1,4

Противофильтрационные устройства (табл. 4.6) в теле и основании плотин. Предусматривают их при необходимости уменьшить фильтрационный расход или градиенты фильтрационного потока с целью недопущения деформаций грунтов плотины и ее основания, а также для повышения устойчивости низового откоса.

Сопряжение пленочных экранов с основанием осуществляют с помощью траншеи (штрабы), заполняемой пластичным местным грунтом или бетоном; при этом градиенты обходной фильтрации должны быть допустимыми для заполнителя штрабы.

В асфальтобетонных экранах швов не предусматривают. В местах примыкания экрана к жестким элементам основания и к бетонным сооружениям устраивают гибкие сопряжения (рис. 4.3). Конструкции сопряжений асфальтовых диафрагм приведены на рисунке 4.4. Основное преимущество диафрагм перед экранами — возможность возведения одновременно с заполнением водохранилища.

Стальные и деревянные экраны, а также бетонные и железобетонные диафрагмы в настоящее время практически не применяют из-за большой трудоемкости и сложности производства работ по их устройству и работ по возведению упорной призмы.

Инъекционные завесы в теле и в основании плотин являются перспективными конструкциями, так как их применение позволяет возводить плотины из песчано-гравелистых и галечно-валунных грунтов отсыпкой в воду без устройства котлована за перемычками, а работы по отсыпке плотины «насухо» выполнять практически круглогодично в любых климатических условиях. Технология строительства инъекционных завес в теле плотин и в аллювиальных грунтах основания одинакова и заключается в нагнетании жидких (впоследствии твердеющих) растворов в поры грунта через систему специальных скважин.

Состав инъекционных растворов и их консистенция зависят в основном от коэффициента фильтрации инъектируемого грунта. Оптимальные составы растворов и их основные свойства приведены в таблице 4.8.

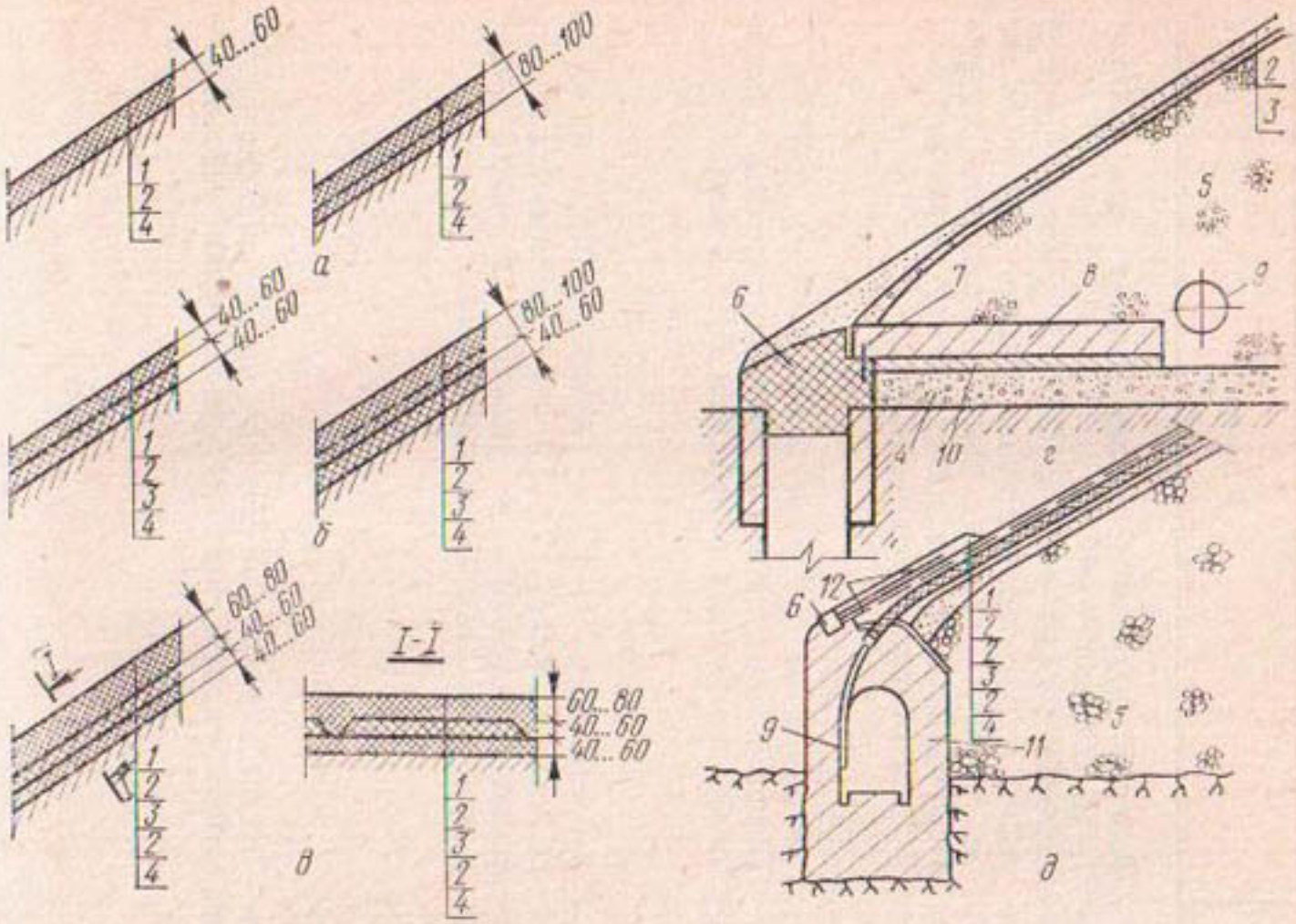


Рис. 4.3. Экраны из асфальтобетона:
а — однослойные; *б* — двухслойные; *в* — трехслойные; *г* — сопряжение экрана с бетонной стенкой в основании; *д* — сопряжение экрана с дренажной галереей; *1* — защитный слой; *2* — плотный асфальтобетон; *3* — дренаж из пористого асфальтобетона; *4* — основание экрана; *5* — тело плотины; *6* — упорный бетонный блок; *7* — металлическая шпонка; *8* — бетонная плита; *9* — дренажная труба; *10* — бетонная подготовка; *11* — бетонная галерея; *12* — медная фольга в два слоя

Противофильтрационные завесы типа «стена в грунте» можно устраивать практически в любых нескальных грунтах (табл. 4.9).

Глубина траншейных завес может достигать 25...30 м; их толщину назначают с учетом напора и материала завесы. Толщина свайных и траншейных стенок из твердеющих материалов или глины — 0,5...1 м; траншейных из глиногрунтовых смесей — 1...4 м.

Дренажные устройства. В состав дренажа входят приемная часть и коллектор. Приемную часть обычно выполняют в виде обратного фильтра из слоев песка, гравия или щебня, а также из пористого бетона. Перспективно применение в качестве фильтров тканых и нетканых синтетических материалов. Коллектор выполняют из труб или в виде лент из крупного щебня и камня. Толщину слоев обратного фильтра устанавливают с учетом условий производства работ, но не менее 0,2 м при отсыпке насухо и 0,5 м — в воду. Гранулометрический состав грунтов обратных фильтров подбирают по методике, изложенной в п. 2.7.

Низовой клин однородных плотин при напорах более 5...6 м дренируют практически всегда. Основные виды дренажа низового клина земляных плотин показаны в таблице 4.10.

Для обеспечения устойчивости откосов плотин из глинистых грунтов и ускорения их консолидации в строительный период применяют заглубленные в тело плотины горизонтальные дренажные тюфяки в сочетании с вертикальным или наклонным плоским дренажем.

Крепление верхового откоса. Различают основное и облегченное покрытие (табл. 4.11). Виды креплений верхового откоса приведены в таблице 4.12.

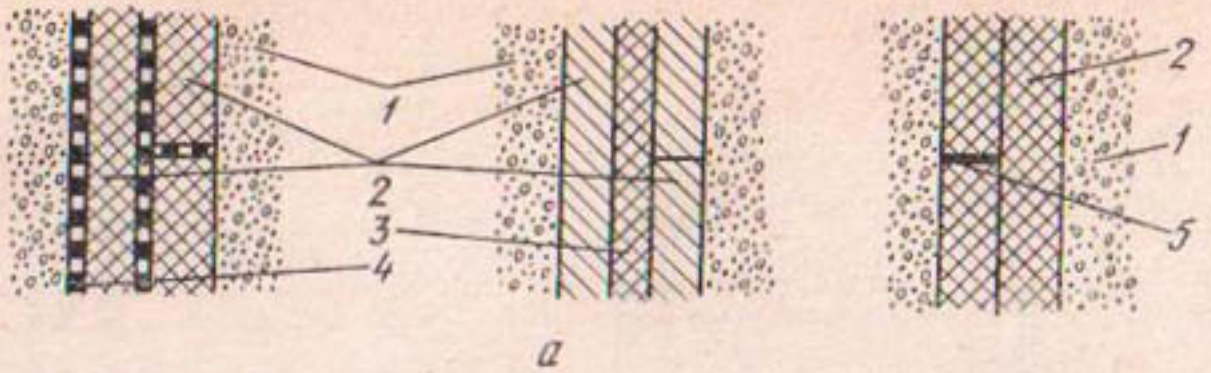
В отдельных случаях целесообразно устройство пологих откосов, крепленых слоем крупнообломочного грунта, биологическим креплением или без

4.6. Противофильтрационные устройства в теле грунтовых плотин

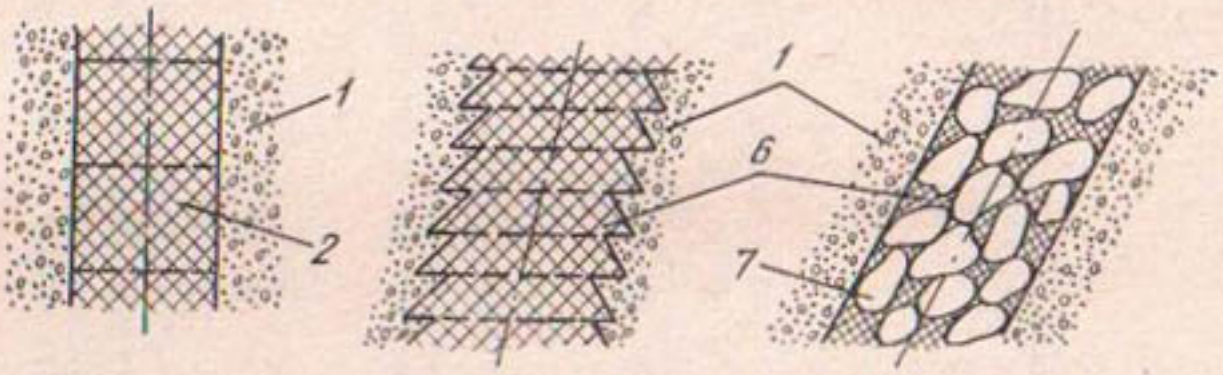
Тип устройства	Материал для изготовления	Размеры
Грунтовые ядра, экраны, понуры	Глинистые грунты с $k \leqslant A \cdot 10^{-6}$ м/с; смесь глинистых грунтов с песком или крупнообломочным материалом; дресвяные и гравийные несуффозионные грунты с $k \leqslant A \cdot 10^{-5}$ м/с. Торф со степенью разложения не менее 50% и влажностью 80...85%, малопроницаемые мелкопесчаные грунты при надлежащем обосновании	Толщина ядра или экрана понизу $b_{um} \geqslant \Delta H \gamma_n / I_{cr,m}$, поверху — 0,8 м. Гребень экрана — выше ФПУ с учетом высоты волны и ветрового нагона, гребень ядра — то же без учета наката волны. Толщина понура $\geqslant \Delta H \gamma_n / I_{cr,m}$, но не менее 0,5 м; длина его 1...2 H, в отдельных случаях 5...6 H
Полимерные экраны и диафрагмы	Полимерные пленки, в отдельных случаях — полиэтиленовые, поливинилхлоридные и бутилкаучуковые. Укладка в один, реже в два слоя	Толщина выпускаемой промышленностью пленки 0,2 и 0,6 мм (за рубежом 0,6...2 мм)
Асфальтобетонные экраны	Однослойные (в большинстве случаев), двух- и трехслойные (для больших напоров и при значительных колебаниях уровня воды в ВБ) из плотного и пористого асфальтобетона (табл. 4.7)	Полосы шириной 2...2,5 см, укладываемые асфальтоукладчиками и уплотняемые при температуре 110...140 °С виброкатками
Асфальтобетонные диафрагмы вертикальные и наклонные	Мелко- и среднезернистый уплотняемый асфальтобетон; пластичный и литой асфальтобетон с втрамбованными камнями диаметром до $^1/_3$ толщины диафрагмы	Толщина $t = a + 0{,}008H$, где $a = 0{,}4...0{,}5$ м. Пористость уплотненного асфальтобетона $\leqslant 3...4\%$

Инъекционные диафрагмы	Специальные уплотняющие растворы, нагнетаемые в поры грунта. Состав растворов приведен в таблице 4.8	Толщина в основании не менее $0{,}1H$
Железобетонные жесткие экраны (преимущественно в каменно-набросных плотинах)	Железобетонные плиты в один или несколько слоев. Армирование плит 0,5...1%. Бетон тяжелый, плотный, водонепроницаемый, со следующими показателями: класс прочности на сжатие $\geqslant$B20; марка по водонепроницаемости $\geqslant$W8; марка по морозостойкости $\geqslant$F100; коэффициент фильтрации $k \leqslant A \cdot 10^{-12}$ м/с	Толщина 0,6...1% высоты плотины, у гребня 0,2...0,3 м
Полужесткие	Плиты на бетонной подготовке, покрытой слоем битума или склеечной гидроизоляцией, заанкерены в подэкрановую кладку	Размер плит до 20 м. Ширина швов — до 25 мм
Гибкие (в сейсмических районах)	Два—пять слоев плит, уложенных с перевязкой швов. Число слоев растет от двух у гребня до пяти у основания. Между слоями прослойки горячего битума толщиной до 4 мм. Плиты и экран заанкерены в подэкрановую кладку	Размер плит до 10 м, толщина 0,08...0,18 м

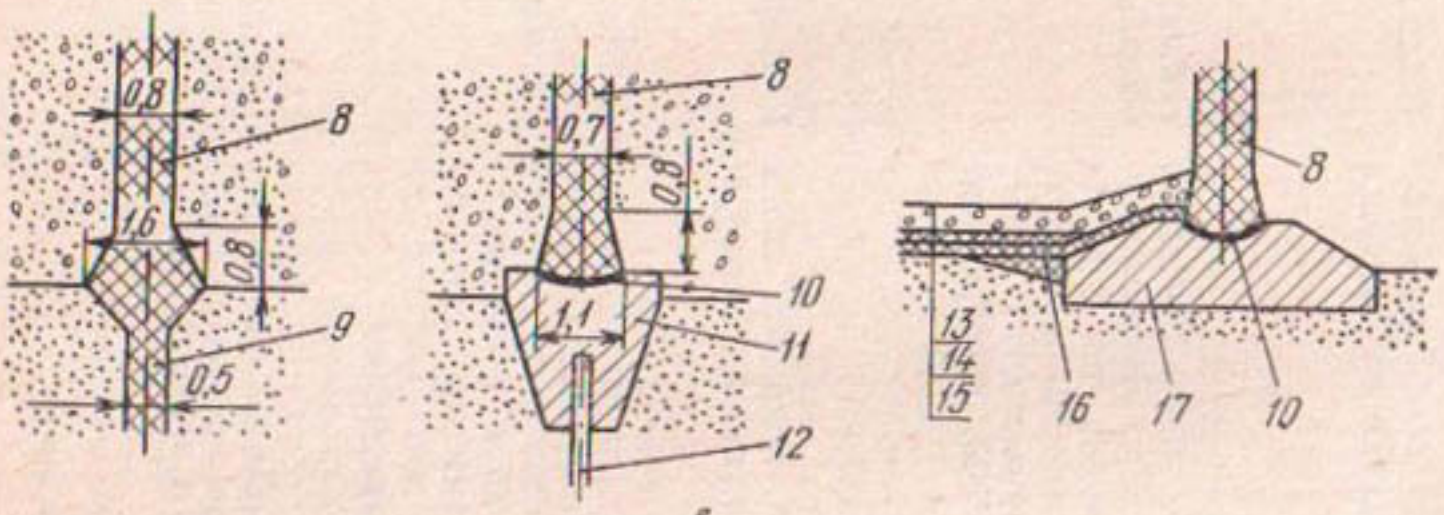
Примечание. ΔH — падение напора в противофильтрационном элементе; $I_{cr,m}$ — критический средний градиент напора (для ядра и экрана из глины или глинобетона равен 12, из суглинка — 8, из супеси — 3, для понура из глины или глинобетона равен 15, из суглинка — 10, супеси — 3); γ_n — коэффициент надежности, равный для сооружений I класса — 1,25; II класса — 1,2, III класса — 1,15, IV класса — 1,1.



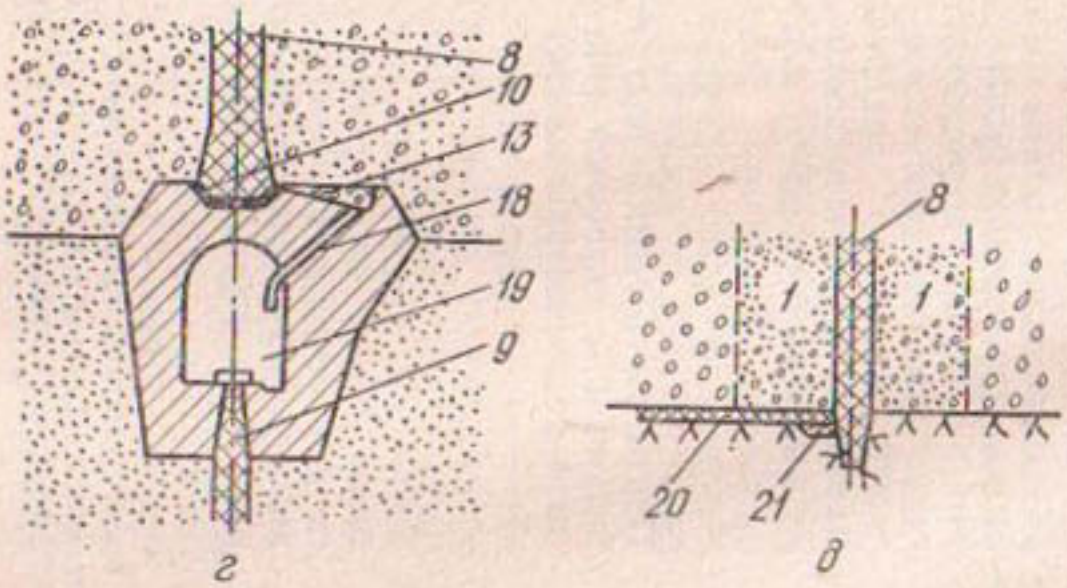
а



б



в



г д

Рис. 4.4. Асфальтовые диафрагмы:

а — сборные; *б* — монолитные; *в* — сопряжение с основанием в плотинах высотой до 50 м; *г* — то же в плотинах высотой более 50 м; *д* — то же с трещиноватой скалой; *1* — переходной слой; *2* — пластичный асфальтобетон; *3* — литой асфальт; *4* — штукатурка из горячей асфальтовой мастики; *5* — обработка битумом; *6* — асфальтобетон; *7* — камень; *8* — диафрагма; *9* — асфальтовая завеса; *10* — асфальтовая мастика; *11* — зуб; *12* — шпунтовая стенка; *13* — гравийно-песчаная смесь; *14, 15* — пористый и плотный асфальтобетон; *16* — асфальтовый армированный мат; *17* — бетонная плита; *18, 19* — дренажная труба и галерея; *20* — понур из уплотняемого асфальтобетона; *21* — щебень

4.7. Состав асфальтобетонов

Содержание по массе, %			
битума	наполнителя	песка	щебня $d<20$ мм
	Плотный		
7...11	15...20	50...80	10...20
	Пористый		
3...5	0...5	50...80	40...65

крепления. Предварительное значение заложения m_h пологих, волноустойчивых откосов из различных грунтов можно определить по графику (рис. 4.5), построенному на основе натурных наблюдений.

Крепление низового откоса. В пределах колебаний уровня и волновых воздействий со стороны НБ крепление низового откоса обычно обеспечивает дренажная призма или верхний слой камня наслонного дренажа. Остальную часть низового откоса защищают от атмосферных воздействий посевом многолетних трав по слою растительного грунта толщиной 0,1...0,2 м, одерновкой в клетку с посевом трав или сплошной одерновкой. В зоне жаркого климата и сильных ветров откосы защищают слоем гравия или щебня толщиной 0,15...0,2м.

4.2.5. СОСТАВ РАСЧЕТОВ ГРУНТОВЫХ ПЛОТИН

При проектировании плотин I и II классов выполняют следующие расчеты: фильтрационные; фильтрационной прочности; обратных фильтров, дренажей и переходных слоев; устойчивости откосов, экрана и защитного слоя; напряжений и деформаций; осадок тела плотины и основания; горизонтальных смещений; креплений откосов на прочность от действия волн, льда и др.

Дополнительно проводят расчеты: фракционирования грунта и устойчивости боковых призм в строительный период для неоднородных земляных намывных плотин; порового давления при их консолидации и проверку их трещиностойкости для земляных насыпных и каменно-земляных плотин, у которых тело, ядро, экран или основание сложены из глинистых грунтов; проверку устойчивости на сдвиг низовой призмы для каменно-земляных плотин с ядром.

Для плотин III и IV классов исключают расчеты осадки тела плотины и основания и горизонтальных смеще-

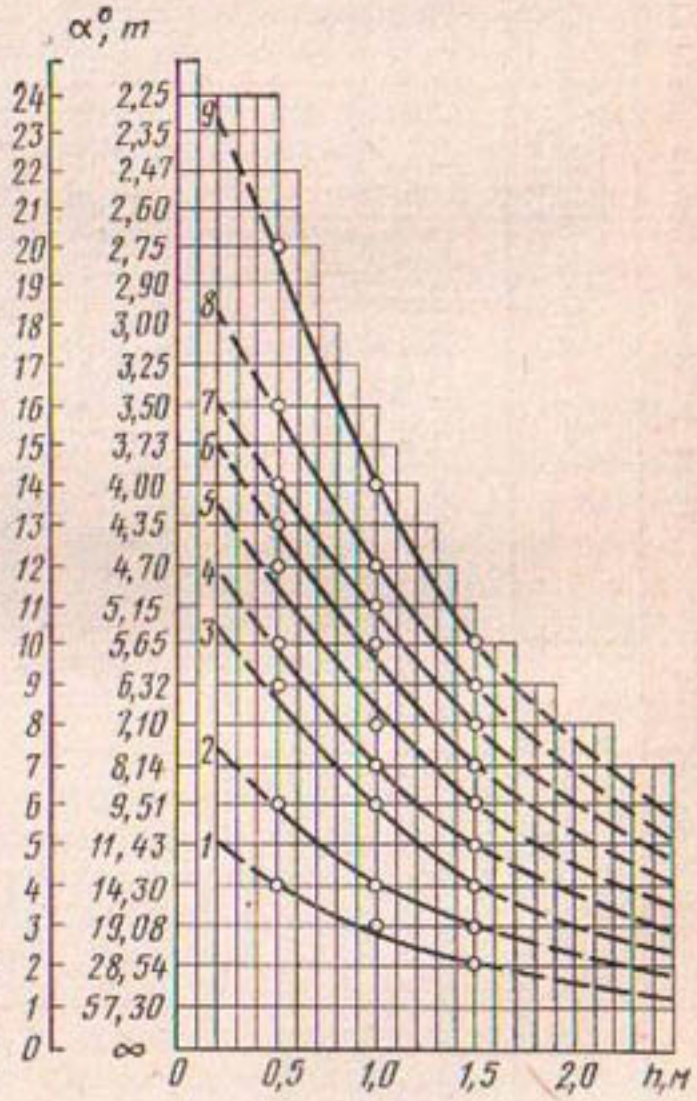


Рис. 4.5. График для определения заложения m волноустойчивых (пологих) грунтовых откосов:

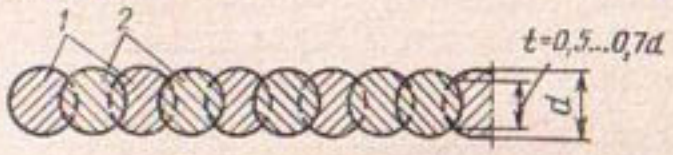
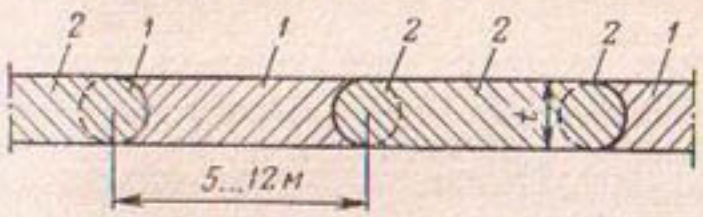
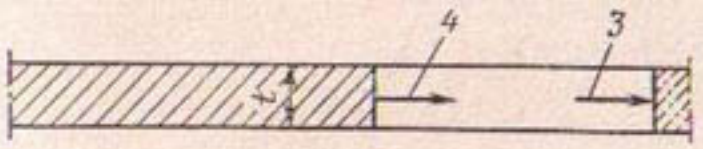
1 — глина; *2* — лесс; *3* — суглинок; *4, 5, 7* — мелкий, среднезернистый и крупный песок; *6* — суглинок со щебнем и валунами; *8* — гравий; *9* — галька (пунктир — экстраполяция); α — угол наклона откоса к горизонту; h — высота волны

4.8. Составы и основные показатели рекомендуемых инъекционных растворов

Вид инъектируемых грунтов	Тип раствора, его состав и расход материалов на 1 м³	Плотность раствора, т/м³	Расплыв по конусу, м	Прочность на сжатие, МПа	Приготовление раствора
Щебенистые, гравелистые, гравийно-галечниковые, песчано-гравелистые с коэффициентом фильтрации $k>50$ м/сут	Цементно-глинистый: Ц : Г = 1 : 4 (цемент — 107 кг, глина — 428 кг); сернокислый алюминий $Al_2(SO_4)_3$ — 15% массы цемента; вода — 0,803 м³; В : Т = 1,5	1,42	0,18	1,5	Сернокислый алюминий вводят в виде водного раствора в глинистый раствор на узле вторичного смешения, после чего в смеситель подают цемент
	Цементно-суглинистый: Ц : С = 1 : 4 (цемент — 148 кг, суглинок — 592 кг); сернокислый алюминий $Al_2(SO_4)_3$ — 15% массы цемента; вода — 0,740 м³	1,50	0,23	2,0	То же
	Цементно-зольный: Ц : З = 1 : 10 (цемент — 88 кг, зола — 880 кг); силикат натрия (жидкое стекло) — 20% массы цемента; вода — 0,678 м³; В : Т = 0,7	1,52	0,20	1,8	В воду затворения вводят силикат натрия в виде раствора с ρ = = 1,18...1,19 т/м³, затем золу. После перемешивания вводят цемент
Песчано-гравелистые и песчаные грунты с коэффициентом фильтрации k = 20...50 м/сут	Глинополимерный: глина — 490 кг, карбамидная смола — 30% массы глины; суперфосфат — 40% массы смолы; вода — 0,44 м³; В : Т = 0,8	1,37	0,18	1,7	Суперфосфат смешивают с водой, затем вводят смолу. После перемешивания вводят глинистый раствор
Песчаные грунты с коэффициентом фильтрации $k<20$ м/сут	Полимерный: карбамидная смола — 400 кг; суперфосфат — 30% массы смолы; вода — 0,5 м³	1,18	Вязкость 10 сП	3,8	Смолу разводят водой в соотношении 1 : 1. Суперфосфат размешивают с водой. Водный раствор смолы при перемешивании вводят в смеситель, где готовят смесь воды с суперфосфатом

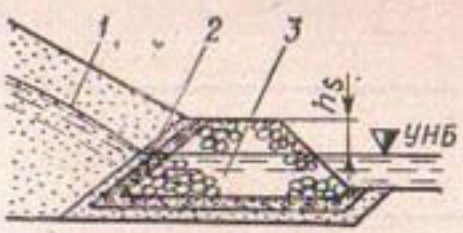
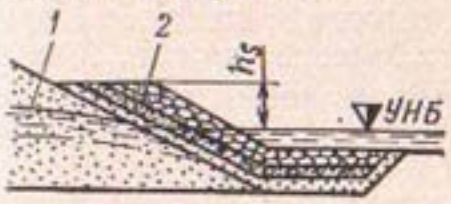
Примечание. Ц, Г, С, З, В, Т — содержание в частях (по массе) соответственно цемента, глины, суглинка, золы, воды, твердых веществ.

4.9. Схемы устройств противофильтрационных завес типа «стена в грунте»

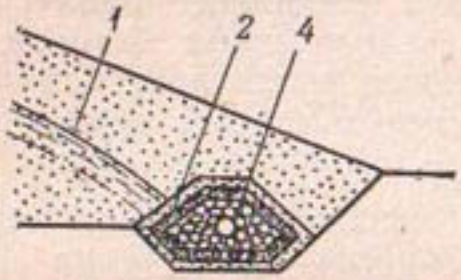
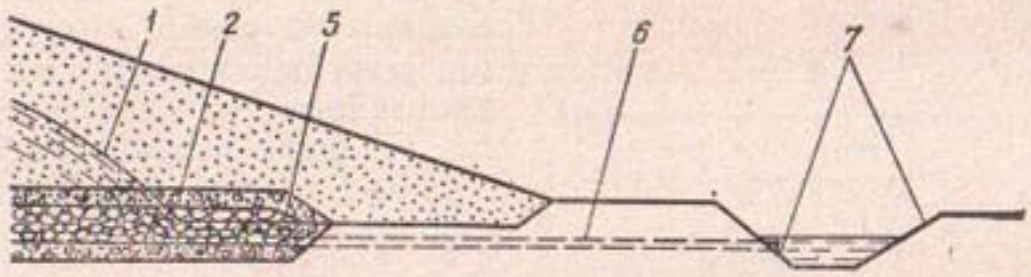
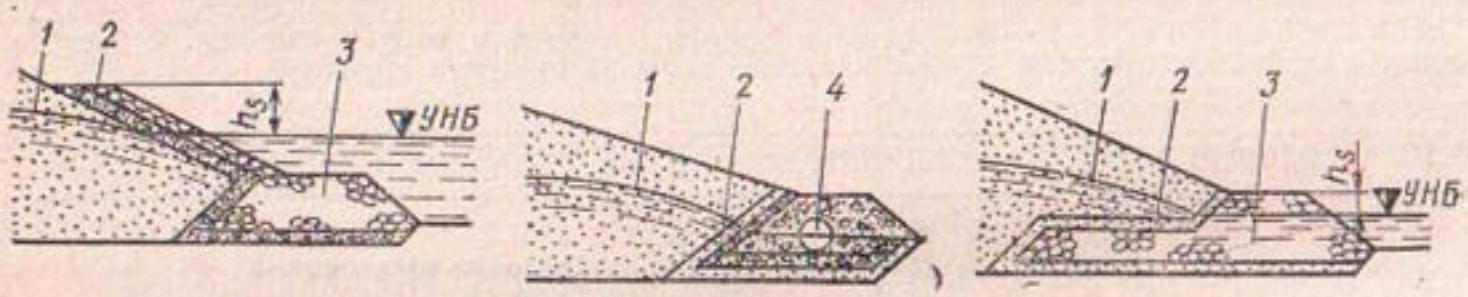
Тип завесы и схема устройства	Схема производства работ
Свайные 	Ряд пробуренных в две очереди пересекающихся скважин диаметром 0,6...1,2 м, заполненных бетоном и глиноцементным раствором. Скважины бурят без обсадных труб под защитой тиксотропного раствора
Траншейные секционные 	Пионерные скважины, бурят через 5...12 м. Участки между ними разрабатывают в две очереди ударным, вращательно-всасывающим бурением или грейферным экскаватором. Заполняют пластичным бетоном или грунтоцементом, постепенно вытесняя тиксотропный раствор в следующую секцию
Непрерывные стенки 	Разрабатывают установками вращательного бурения, траншеекопателями, многоковшовыми экскаваторами, драглайнами и канатными скреперами. По мере разработки траншеи заполняют глиной или глиногрунтовой смесью
Тонкие стенки	Вибропогружение в грунт металлических свай двутаврового сечения с последующим заполнением щели цементным раствором

Примечание. *1, 2* — скважины и траншеи первой и второй очереди; *3* — направление разработки траншей; *4* — направление засыпки траншеи грунтом.

4.10. Основные виды дренажа низового клина земляных плотин

Схема и вид дренажа	Область применения
Дренажный банкет 	Русловая часть плотины при ее возведении без перемычек и при отсыпке камня в воду. Превышение гребня h_s выше максимального уровня НБ с учетом ветрового нагона и высоты наката волн, но не менее 0,5 м. Ширина банкета поверху не менее 1 м
Наслонный дренаж 	На участках плотин, перекрывающих пойму, и при отсутствии на месте строительства достаточного количества камня. Толщина не менее $t=5\,d_{s,85}+t_f$ ($d_{s,85}$ — диаметр частиц, масса которых с массой более мелких фракций составляет 85% массы грунта дренажного слоя; t_f — толщина обратного фильтра). Превышение гребня h_s — то же, что для дренажного банкета с учетом выклинивания вод на низовой откос и глубины промерзания

Продолжение

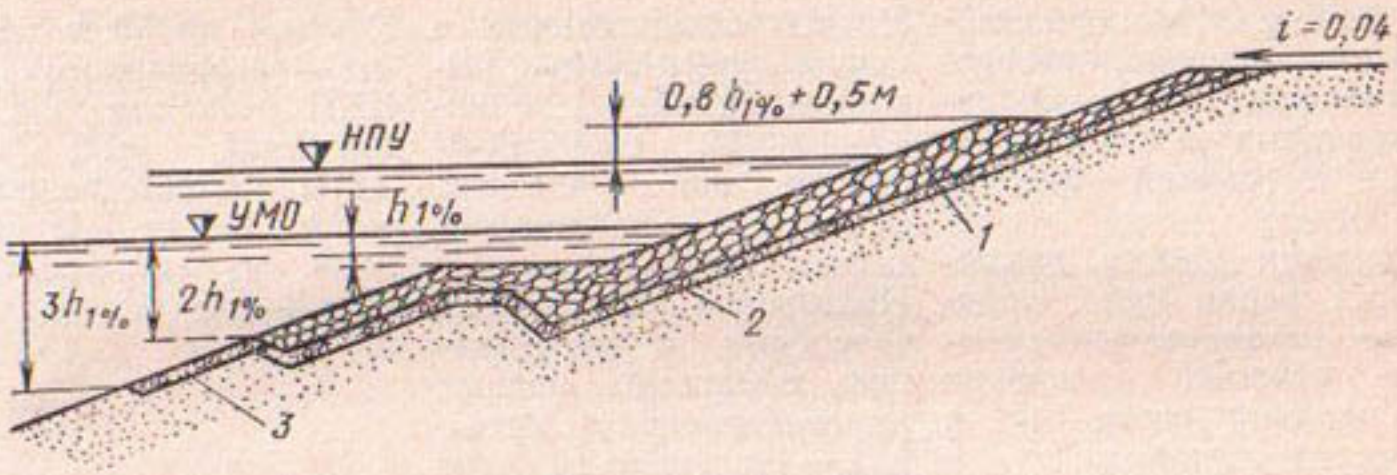
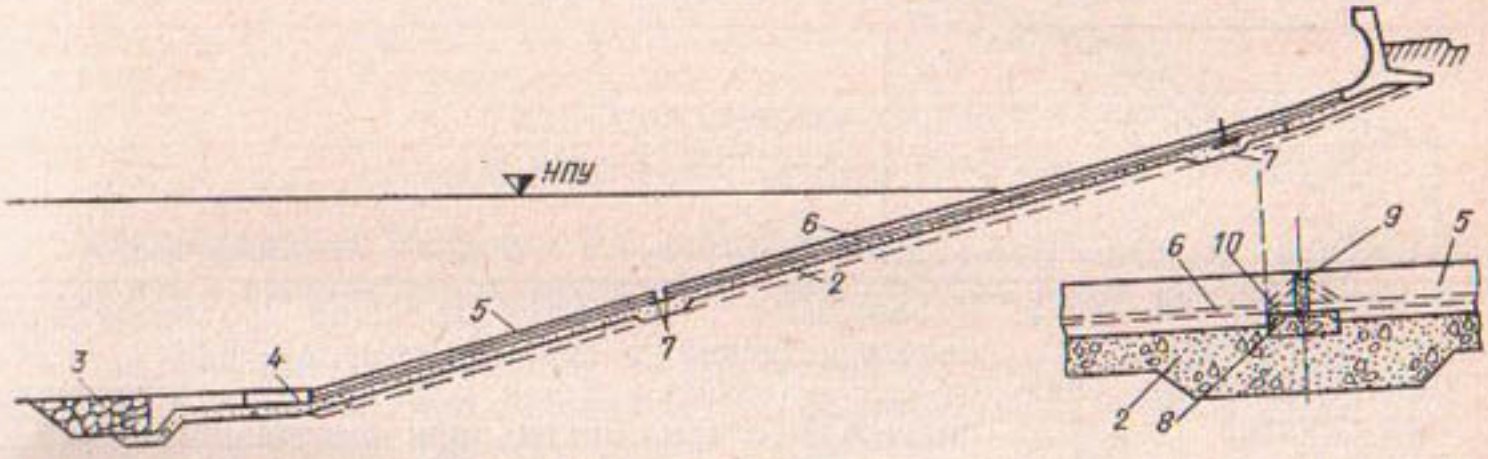
Схема и вид дренажа	Область применения
Трубчатый дренаж 	Береговые участки плотин. Сечение и расстояние между отводящими дренами определяют гидравлическим расчетом из условия обеспечения безнапорного движения воды в дренаже
Горизонтальный дренаж	На участках плотины, где требуется заглубление депрессионной кривой или ускорение консолидации маловодопроницаемых грунтов основания. Заглубление в тело плотин из глинистых грунтов на 0,3...0,5 b, песчаных — на 0,25...0,3 b (b — ширина плотины по подошве)
	
Комбинированный дренаж	Русловая часть плотины и участки затапливаемой поймы. Отметку гребня банкета назначают из условия перекрытия реки
	

Примечание. *1* — кривая депрессии; *2* — обратный фильтр; *3* — банкет; *4* — труба; *5* — дренажная лента; *6, 7* — отводящие труба и канава.

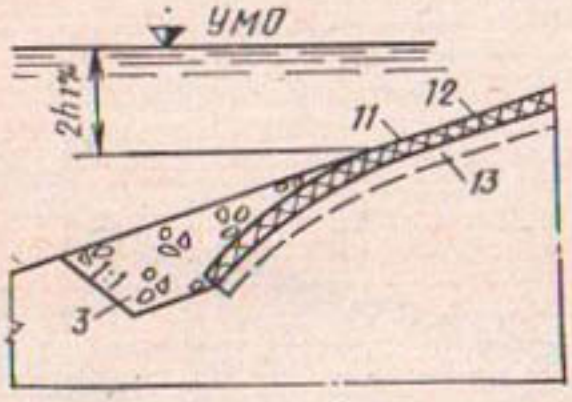
4.11. Покрытия верхового откоса земляных плотин

Тип покрытия	Верхняя граница	Нижняя граница
Основное — в зоне максимальных волновых и ледовых воздействий	Гребень плотины. При значительном возвышении гребня над расчетным уровнем воды в ВБ — отметка ветрового нагона и наката волн	Ниже уровня мертвого объема на $2h_{1\%}$ ($h_{1\%}$ — высота волны 1%-ной обеспеченности) и ниже подводной кромки льда на половину его расчетной толщины
Облегченное — ниже и выше основного	Гребень плотины во всех случаях	На отметке, где скорость волны не превышает допустимую для грунта откоса

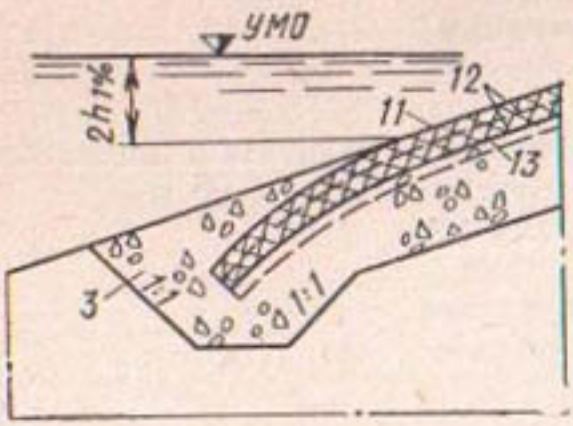
4.12. Виды креплений верховых откосов земляных плотин

Вид и схема креплений	Материал изготовления	Основные размеры, м
 Каменная наброска	Камень несортированный (сортированный при обосновании) плотностью $\rho \geqslant 2{,}4...2{,}9$ т/м³, предел прочности при водонасыщении $R_c \geqslant 40...50$ МПа, класс морозостойкости $F \geqslant 50...150$ Подготовка — однослойная из щебня или крупнообломочного грунта с $k_{60,10}=5...20$	Толщина наброски из несортированного камня $\geqslant 3\,d_d$, из сортированного $\geqslant 2{,}5\,d_d$, где d_d — расчетный диаметр камня, приведенного к шару Толщина подготовки $\geqslant 0{,}1$ м
 Железобетонное монолитное (при высоте волны $h_{1\%} > 1{,}5...2$ м)	Монолитные секции, разделенные температурными швами на плиты. Армирование однослойное (с нижней стороны), иногда двухслойное. Нижняя арматура — непрерывная, верхняя (при наличии) — арматурные пояса по периметру плит Подготовка — однослойная из песчано-гравийной смеси или щебня. При надежном закрытии швов на гравелисто-песчаных откосах — без подготовки	Секции — 40...60 м, плиты — 5...20 м, иногда и больше. Армирование — 0,2...0,3%. Толщина плит — 0,15...0,3 м. Толщина подготовки — 0,15...0,25 м

Вид и схема креплений	Материал изготовления	Основные размеры, м
Сборные омоноличенные — широкое распространение на водохранилищных плотинах низких и средней высоты. Сборные плиты с открытыми швами применяют редко при слишком неравномерной осадке откосов, креплении подводной части и в зимних условиях	Плиты, объединенные в карты путем сварки выпусков арматуры с последующим омоноличиванием швов бетоном, цементным раствором, асфальтобетоном Подготовка на грунтах, способных к разжижению, обратный фильтр; на гравелистых и песчаных — однослойная из песчано-гравийной смеси толщиной 0,1...0,2 м или без подготовки	Карты — до 30 м. Плиты — унифицированные ПКП размером 2×4 м, толщиной 0,12; 0,15; 0,2 м соответственно при высоте волны $\leqslant 1$; $\leqslant 1{,}5$; $>1{,}5$ м и толщине льда — 0,4; 0,6; 0,8 м
Асфальтобетонное — водохранилищные плотины низкие и средней высоты:	Конструкции покрытия аналогичны экранам (см. рис. 4.3, *а*, *б*)	



однослойное на песчаном основании однослойное на связных грунтах	Укладывают покрытие непосредственно на грунт откоса: уплотненный, или покрытый слоем битумной эмульсии, или пропитанный разжиженным битумом. Для увеличения долговечности покрытия — подготовка из щебеночного или гравелистого битуминизированного слоя	Толщина однослойного покрытия — 0,04; 0,06; 0,08 м соответственно при высоте волны $\leqslant 0{,}5$; 0,5...1; 1...1,5 м и толщине льда — 0; до 0,4; 0,6 м. Толщина битуминизированного слоя — 0,06...0,1 м. Расход битумной эмульсии — 1,5...2 кг/м²; битума — 12...17 кг/м²



Продолжение

Вид и схема креплений	Материал изготовления	Основные размеры, м
двухслойное	Плотный асфальтобетон на дренажном слое из пористого бетона. Подготовка — щебеночная или гравийная битумизированная	Толщина слоев: асфальтобетонного — 0,04...0,1 м; из пористого бетона — 0,04...0,06 м; подготовки — 0,06...0,1 м
Грунтоцементная смесь — на плотинах III и IV классов при высоте волны до 1...1,5 м	Горизонтальные слои, уплотненные катками (гладкими, затем на пневмомашинах), из смеси песка, портландцемента (7...10% по массе) и воды	Толщина слоев до 0,15 м

Примечание. *1* — основное крепление из камня; *2* — подготовка однослойная или слоистая; *3* — облегченное крепление; *4* — упор основного крепления; *5* — железобетонные плиты; *6* — арматура; *7* — швы; *8* — балка; *9* — просмоленная доска; *10* — битумный мат; *11* — защитный слой; *12, 13* — плотный и пористый асфальтобетон.

ний. Расчеты проводят для наиболее характерных поперечных сечений плотины. Во всех случаях их выполняют для основных и особых сочетаний нагрузок в эксплуатационный и строительный периоды.

4.3. БЕТОННЫЕ И ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫЕ ПЛОТИНЫ

4.3.1. КЛАССИФИКАЦИЯ БЕТОННЫХ И ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ПЛОТИН

Классификация бетонных и железобетонных плотин дана в таблице 4.13, а основные достоинства и недостатки таких плотин были приведены в таблице 4.1.

Тип плотины выбирают на основе технико-экономического сравнения вариантов с учетом основных факторов: топографии и геологии створа, гидрологических и климатических условий, компоновки гидроузла, организации и технологии производства, наличия местных строительных материалов, условий строительства и принятого способа пропуска строительных и эксплуатационных расходов.

4.3.2. ГРАВИТАЦИОННЫЕ ПЛОТИНЫ

Основные конструкции гравитационных плотин приведены в таблице 4.14, а общий вид и элементы конструкции — на рисунке 4.6.

Поперечный профиль гравитационных плотин принимают треугольной формы с вершиной (рис. 4.7, точка А) на отметке НПУ, а иногда ФПУ в ВБ. Варианты заложения верховой m_h и низовой m_l граней приведены на рисунке 4.7. Предварительные размеры профиля можно назначать по графикам, представленным на рисунке 4.8. Окончательный профиль определяют проверкой прочности плотины и ее устойчивости на сдвиг (см. гл. 2) при минимальном объеме тела плотины.

Конструкция и ширина гребня плотины зависят от ее вида, условий производства работ, ширины проезжей части и подкрановых путей, ледовых

4.13. Классификация бетонных и железобетонных плотин

Принцип классификации	Типы плотин	Отличительная особенность
По принципу обеспечения устойчивости (сопротивления сдвигающим силам)	Гравитационные (массивные и облегченные, см. табл. 4.14)	Устойчивость обеспечивается собственной массой плотины
	Контрфорсные (см. табл. 4.27)	Состоит из напорных перекрытий (плоских плит, арок, массивных оголовков) и ряда контрфорсов (стенок), передающих давление воды ВБ на основание
	Арочные ($b/h \leqslant 0{,}35$)*, см. табл. 4.28, 4.29 Арочно-гравитационные ($b/h > 0{,}35$)* * b и h — соответственно ширина по подошве и высота плотины	Устойчивость и прочность криволинейной в плане плотины обеспечивается в основном работой ее как свода с передачей нагрузки на берега или устои
По технологическому назначению	Глухие (см. табл. 4.14)	Пропуск воды в НБ через плотину не допускается
	Водосбросные (см. табл. 4.22)	Пропуск воды в НБ (поверхностным переливом или через специальные водосбросы в теле плотины) осуществляют через плотину
По высоте	Низкие Средней высоты Высокие	h до 40 м; h=40...100 м; h более 100 м
По способу возведения	Монолитные (в большинстве случаев)	Возводят секционно из монолитного бетона
	Сборно-монолитные	Из блоков спаренных железобетонных плит, омоноличенных бетоном
	Сборные	Из сборных элементов, соединяемых сваркой (или без нее) и бетоном

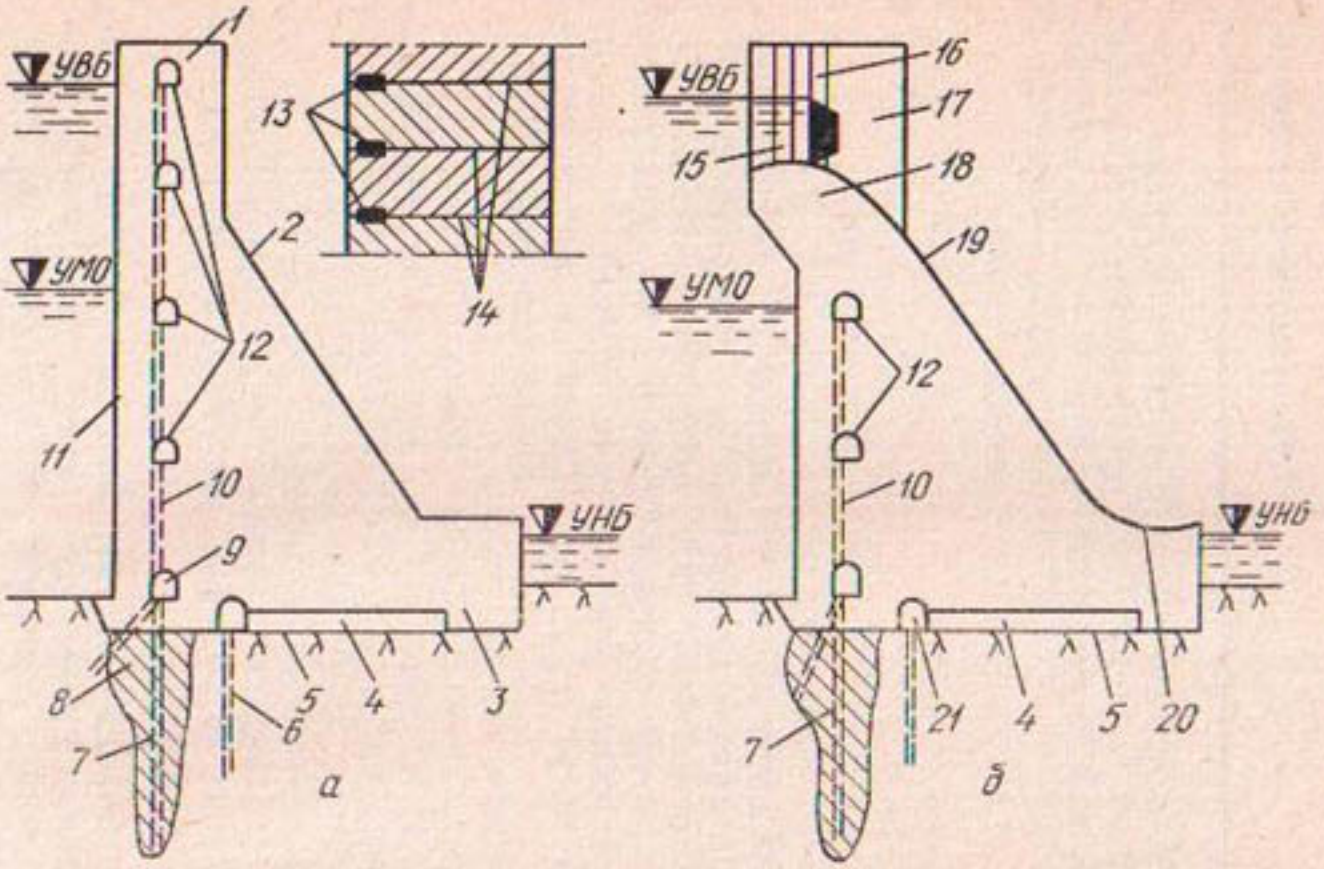


Рис. 4.6. Гравитационные плотины на скальном основании:

а — глухая плотина; *б* — водосливная плотина; *1* — гребень; *2* — низовая грань; *3* — низовой клин; *4* — разгрузочная полость (горизонтальный дренаж); *5* — подошва; *6* — дренажные скважины основания; *7* — противофильтрационная (обычно цементационная) завеса; *8* — сопрягающая цементация; *9* — цементационная галерея; *10* — дрены тела плотины; *11* — напорная грань; *12* — смотровые галереи; *13* — противофильтрационные уплотнения; *14* — температурные швы; *15* — паз ремонтного заграждения; *16* — паз рабочего затвора; *17* — бык; *18* — гребень водослива; *19* — водосливная грань; *20* — носок-трамплин; *21* — дренажная галерея

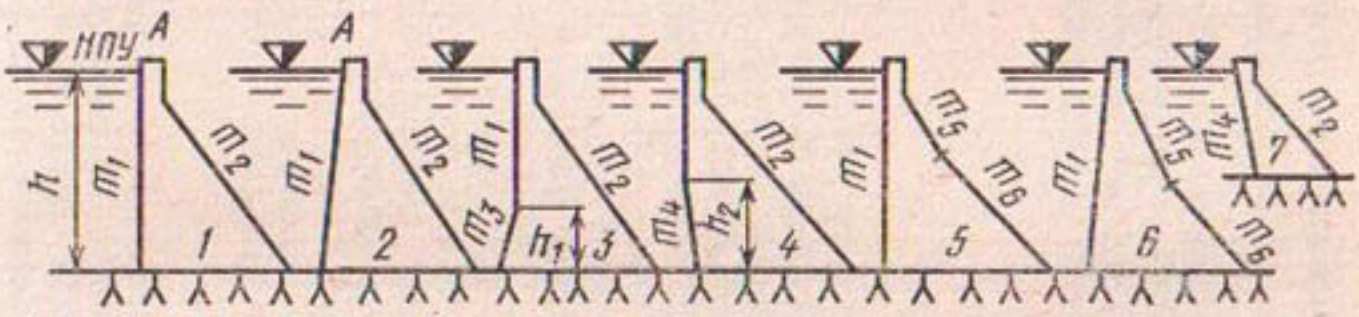


Рис. 4.7. Профили гравитационных плотин:

1...7 — варианты профилей плотины; m_1=0...0,075 до 0,18; m_2=0,65...0,85; m_3=0,15...0,4; m_4=0,03...0,05; m_5=0,15...0,62; m_6=m_2; h_1=0,15...0,4 h; h_2 — до 0,42 h; h — высота плотины

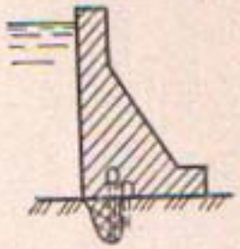
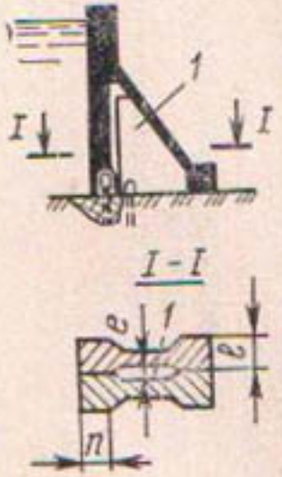
и волновых воздействий; последние требуют иногда его армирования. Минимальная ширина гребня — 2 м.

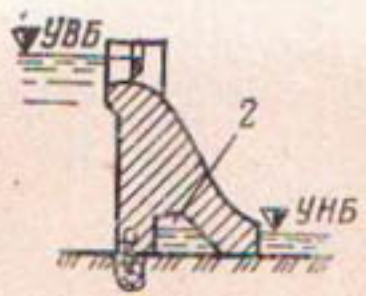
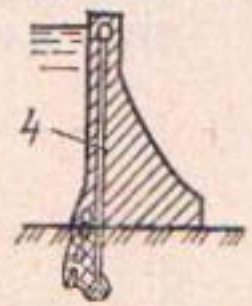
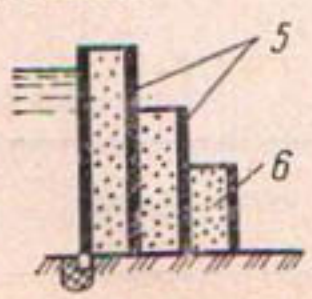
Возвышение гребня плотины над уровнем ВБ определяют по формуле (4.1) при величине запаса возвышения гребня плотины a (с учетом и без учета парапета) для плотин I класса — 0,8 м; II — 0,6 м, III и IV — 0,4 м. При наличии водонепроницаемого парапета $h_п$ отсчитывают до его верха; отметка гребня плотины может быть снижена, но не должна быть ниже ФПУ.

Противофильтрационные мероприятия в теле плотины снижают противодавление и уменьшают опасность выщелачивания бетона. Основные мероприятия: дренаж тела плотины (табл. 4.15); на верховой грани — укладка бетона повышенной водонепроницаемости; устройство экранов: полых или из асфальта, металла, полимеров.

Противофильтрационные мероприятия в основании плотины уменьшают противодавление на подошву, снижают фильтрационные расходы, предохраняют от механической и химической суффозии. Основные виды: противофильтрационные завесы, понуры и дренаж основания (рис. 4.9, 4.10; табл. 4.16). Выбор противофильтрационного мероприятия зависит от свойств основания.

4.14. Основные конструкции глухих гравитационных плотин

Конструктивный вариант плотины	Характеристика основных элементов	Преимущества и недостатки
Массивная (общий тип) 	Массивное сооружение треугольного профиля, масса которого обеспечивает его устойчивость при воздействии всех приложенных к нему сил. Очертание профиля определяют исходя из условия устойчивости на сдвиг, прочности и минимального объема плотины	Получили широкое распространение вследствие простоты возведения. Недостаток — большой расход бетона
Облегченные: с расширенными швами 	Расширенные швы уменьшают фильтрационное и взвешивающее давление, ускоряют остывание бетона, служат средством регулирования напряжений в бетоне при условии обогрева полостей, полости используют для установки бетоновозных эстакад, хозяйственных нужд, осмотра и ремонта плотины. Размеры шва: e=3...9 м, n=0,4...1 l, переходный участок от оголовка к стенке имеет угол 45°. Расширенные швы могут иметь переменную ширину по длине плотины	Экономия бетона 7...15%, уменьшение стоимости на 5...12%. Недостаток — усложнение производства работ. Широкого распространения не получили
с продольной полостью основания	Облегчается регулирование температурного режима (в нижней части); увеличиваются сжимающие напряжения у напорной грани; проще устройство противофильтрационных завес, сбор и отвод воды; возможен сквозной проход. Наиболее точно напряжения определяют методом фотоупругости	Экономия бетона аналогична предыдущей плотине. Усложнение производства работ. Применяют редко

с предварительным напряжением бетона: с анкером или без него  	При анкеровке с *домкратами* стальные анкерные тяжи, заделанные в скалу и проходящие свободно через тело плотины, натягивают домкратами; усилие натяжения передается на плотину, улучшая напряженное состояние. Для тяжей используют проволоку диаметром 5...7 мм (число нитей 12...555), пакеты стержней диаметром 28...36 мм (число стержней 24...28), трубы. Усилия в тяжах 1500...11 760 кН или до 1840 кН на 1 м длины плотины. Шаг анкеров 3...8 м. При *бездомкратном* предварительном напряжении используют эффект разрезки плотины швами и поэтапность возведения или натяжные блоки	Экономия бетона до 30...40%, снижение стоимости на 10...20%. Недостаток — сложность анкеровки, трудность антикоррозионной защиты тяжей
с экраном на напорной грани	Первый тип — обычного или распластанного профиля, второй — обжатого профиля, экраны металлические (из нержавеющей стали, толщина 2...6 мм, расход 16...55 кг на 1 м² напорной грани), железобетонные, полимерные. Для снятия касательных напряжений между экраном и плотиной используют упругие прокладки, за экраном устраивают дренаж	Экономия бетона 15%, снижение стоимости на 10%. Усложнение производства работ. Пока применяют редко, но перспективны
ячеистая 	Возможно строительство плотин низких и средней высоты из монолитного бетона, сборно-монолитных (получили наибольшее распространение), сборных с соединением элементов сваркой (или без нее) и бетоном. Ячейки заполняют грунтом, камнем (есть предложения водой). Размеры ячеек — 1,5×1,5...6×6 м; расход арматуры 20...30 кг на 1 м³ бетона; толщина стенок ячеек — 0,1...0,6 м, контрфорсов — 0,1...1 м. Грунт подают автомобилями или транспортерами	Экономия бетона до 20...45% при возведении на нескальных основаниях

Примечание. *1* — расширенные швы; *2* — продольная полость; *3* — экран; *4* — анкер; *5* — каркас сборный, сборно-монолитный, монолитный бетон; *6* — засыпка грунтом, камнем.

4.15. Типы дренажа тела плотин

Тип дренажа	Размеры, м	Отвод воды из дренажа	Особенности технологии строительства
Вертикальный трубчатый дренаж (см. рис. 4.6,*а*, *б*)	Диаметр труб — 0,1...0,3; шаг — 2...3; расстояние до напорной грани — не менее 2 м, но не более $\gamma_n H_d I_{cr,m}$ (H_d — напор под расчетным сечением; $I_{cr,m}$ — допускаемый градиент напора, равный 25 для гравитационных плотин и массивно-контрфорсных и 50 для арочных плотин)	Вода из дрен отводится в продольные галереи, из них самотеком в НБ или в дренажные колодцы, откуда ее откачивают	Постепенное поднятие обсадных труб, служащих одновременно опалубкой. Закладка труб из пористого бетона или металлической сетки
Горизонтальный дренаж (горизонтальные канавки)	Ширина — 0,3...0,4; шаг по высоте — 0,5...1,5	В дренажные колодцы или смотровые скважины в межсекционных швах	Канавки прокладывают после укладки бетона вручную или с помощью виброплощадок
Дренажные шахты (дренирующий эффект хуже)	Диаметр шахт — 0,7...1,8; шаг — 4...6	Вода из шахт отводится в продольные галереи	Применяют редко

4.16. Типы дренажа в основании плотины

Тип дренажа	Размеры, м	Отвод воды из дренажа	Особенности строительства
Вертикальный (дренажная завеса) из одного или двух рядов скважин	Диаметр скважин — 0,2...0,25, шаг — 2...5. Расстояние до противофильтрационной завесы 2...3 l, но не более 4 м. Глубина скважин 0,5...0,75 d_{as} (d_{as} — глубина противофильтрационной завесы)	Скважины завесы выводят в нижнюю дренажно-смотровую галерею	Сооружают после противофильтрационной завесы. При опасности обрушения крепят перфорированными трубами с гравийными фильтрами
Наклонный	То же	То же	Устраивают при выполнении дренажа и противофильтрационной завесы или двух дренажных завес из одной галереи
Комбинированный	»	»	Сочетание горизонтального и вертикального дренажа для усиления его эффективности
Горизонтальный: поперечные галереи, продольные и поперечные борозды, крупные продольные галереи	Шаг — 11...15; уклон дна меньше или равен 0,02	Отводят воду в НБ	Одну из продольных галерей устраивают выше максимального уровня НБ для самотечного отвода воды из вышележащей части плотины; из нижележащих галерей воду откачивают

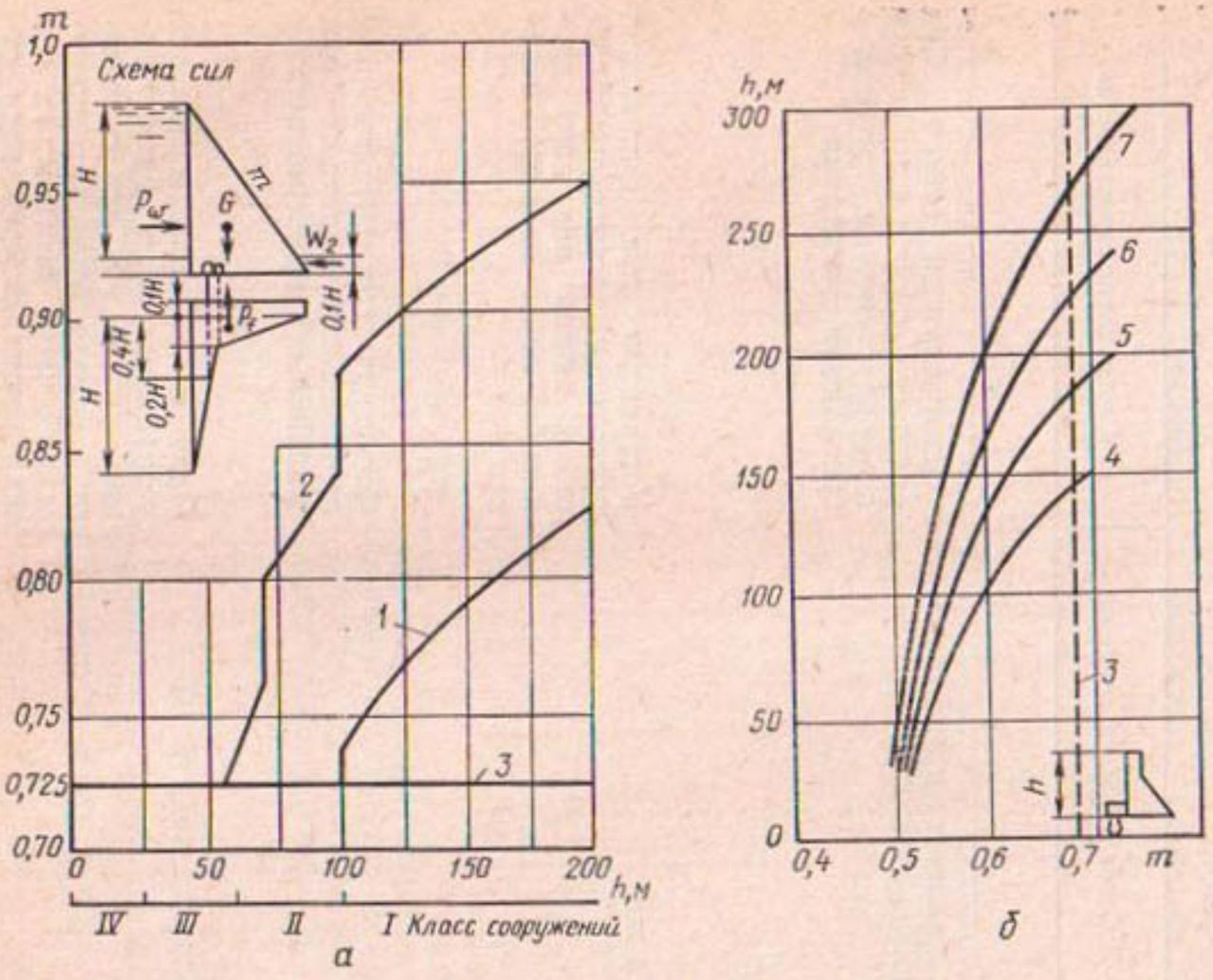


Рис. 4.8. Графики для выбора профиля гравитационной плотины:

а — без понура для сил, приведенных на схеме; *б* — с коротким понуром, противофильтрационной завесой в ВБ и швами-надрезами на верховой грани; *1* — ограничения по условию устойчивости для скальных сильнотрещиноватых грунтов с R=15...50 МПа и малопрочных с R=5...15 МПа; *2* — ограничения для полускальных грунтов с R<5 МПа; *3* — ограничения по условию устойчивости по отсутствию вертикальных растягивающих напряжений; *4, 5, 6, 7* — ограничения по расчетному сопротивлению сжатию бетона низовой грани (*4* — R_b=15; *5* — R_b=20; *6* — R_b=25; *7* — R_b=31 МПа)

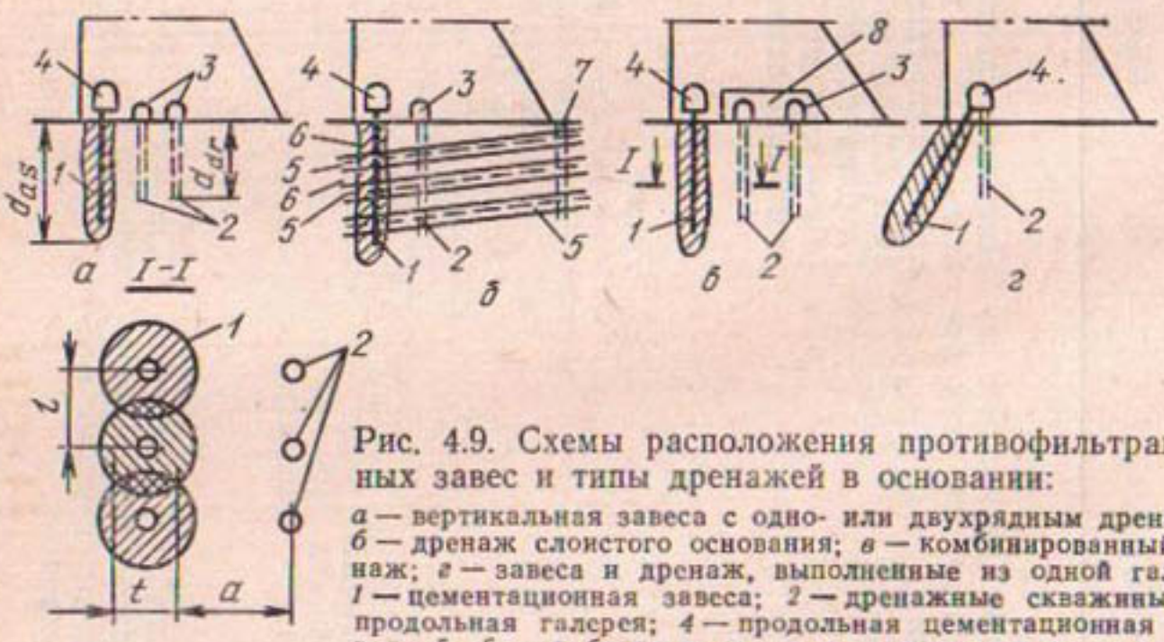


Рис. 4.9. Схемы расположения противофильтрационных завес и типы дренажей в основании:

а — вертикальная завеса с одно- или двухрядным дренажем; *б* — дренаж слоистого основания; *в* — комбинированный дренаж; *г* — завеса и дренаж, выполненные из одной галереи; *1* — цементационная завеса; *2* — дренажные скважины; *3* — продольная галерея; *4* — продольная цементационная галерея; *5, 6* — слабопроницаемые и сильнопроницаемые слои; *7* — разгрузочный дренаж; *8* — горизонтальный дренаж; *l* — шаг скважин; *t* — толщина завесы; *a* — расстояние от завесы до оси дренажа; d_{as} и d_{dr} — глубина завесы и дренажа соответственно

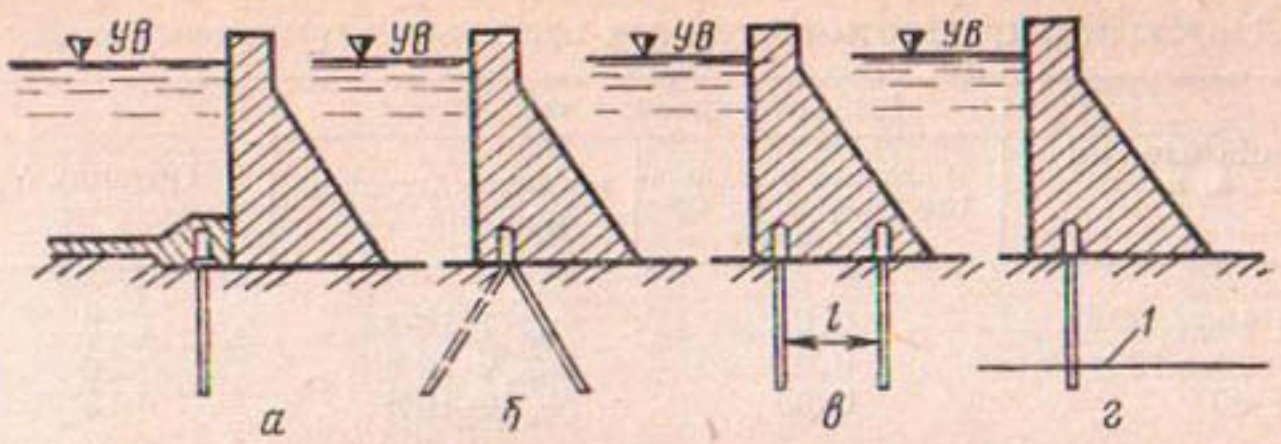


Рис. 4.10. Мероприятия для борьбы с химической суффозией:
а — понур и дренаж под понуром; *б* — наклонные противофильтрационные завесы; *в* — две завесы; *г* — завесы до нерастворимых пород; *1* — граница нерастворимых пород

Основание	Противофильтрационные мероприятия
Слабоводопроницаемые грунты $k<$ $<0{,}1$ м/сут	Дренаж основания и укрепительная цементация контакта плотины с основанием
Грунты с достаточной водопроницаемостью $k\geqslant 0{,}1$ м/сут	Противофильтрационные завесы или понуры и дренаж
Слабые породы, не допускающие высоких давлений; полускальные с глинистым заполнителем трещин; плохо цементируемые; с чередованием скальных и рыхлых пород; карсты	Противофильтрационные стенки
Грунты, содержащие растворимые включения (ангидриды, гипсы, каменную соль)	Глубокие противофильтрационные завесы до нерастворимых пород; наклонные завесы, отклоняющие фильтрационный поток от участка, где необходимо исключение суффозии; понуры с дренажем в конце; два ряда завес на расстоянии $l<0{,}5\,(d_1-d_2)$, где d_1 и d_2 глубины соседних завес
В тектонических зонах, направленных вдоль фильтрационного потока	Понуры

Противофильтрационные завесы (ПФЗ) применяют для перекрытия путей сосредоточенной фильтрации, снижения фильтрационных расходов и уменьшения фильтрационного давления. Различают инъекционные завесы, создаваемые нагнетанием раствора через скважины; противофильтрационные стенки; комбинированные завесы (частично в виде стенок, частично — буровых скважин).

Глубину ПФЗ при близко расположенном водоупоре доводят до него, а при его отсутствии — до зоны с удельным водопоглощением q, зависящим от напора на плотину H:

H, м	30	30...100	100
q, л/мин	0,05	0,03	0,01

При растворимых породах должно быть $q\leqslant 0{,}01$ л/мин ($K<2\cdot 10^{-5}$ см/с). На практике глубина ПФЗ составляет от 0,5...0,8 H до H.

Толщину завесы приближенно назначают из условия обеспечения допускаемых градиентов на завесе: $I_{max}<I_{cr,m}$, где $I_{max}=\Delta/l$, Δ — коэффициент приведения, приближенно равный при $b/h_{as}<1$ $\Delta=0{,}75\ldots0{,}85$; при $b/h_{as}=1\ldots2$ $\Delta=0{,}7\ldots0{,}75$; при $b/h_{as}\geqslant 2$ $\Delta=0{,}65\ldots0{,}7$ (b — ширина подошвы; h_{as} — глубина завесы); при отсутствии дренажа в основании толщину заве-

4.17. Допускаемые градиенты напора для противофильтрационных завес

Высота плотины h, м	Водопроницаемость тела завесы		Градиент $I_{cr,m}$
	удельное водопоглощение q, не более, л/мин	коэффициент фильтрации k, см/с	
Более 100	0,01	$\leqslant 1\cdot10^{-5}$	30
60...100	0,03	$\leqslant 6\cdot10^{-5}$	20
Менее 60	0,05	$\leqslant 10\cdot10^{-5}$	15

сы уменьшают на 20...25%. Допускаемые градиенты $I_{cr,m}$ приведены в таблице 4.17.

Число рядов скважин при устройстве инъекционных завес должно обеспечить необходимую толщину завесы t. Расстояние между рядами скважин и между скважинами в ряду обычно принимают от 1,4...2 м до 3...4 м; оно зависит от трещиноватости скалы. Диаметр скважин: 45...76 мм (до 100 мм). Цементация эффективна при раскрытии трещин $\delta>0{,}1$ мм; при этом давление нагнетания $p_0=1...3$ МПа зависит от консистенции раствора и раскрытия трещин. При отсутствии пригрузки бетона, например в береговой завесе, цементацию начинают при давлении около 0,05 МПа. Расстояние от оси ПФЗ до напорной грани — 0,1...0,25 t; при наличии понура ее выносят в его зону, где отсутствуют растягивающие напряжения. Под подошвой, около напорной грани или в пределах ПФЗ, обычно устраивают сопрягающую цементацию — местное усиление ПФЗ дополнительными рядами неглубоких скважин. ПФЗ могут быть вертикальными и наклонными (при вертикальных или близких к вертикальным трещинах). Средний коэффициент фильтрации ПФЗ $k_m\approx5\cdot10^{-4}$ см/с. Допускаемая ширина раскрытия трещин в них $\delta_{as}\approx0{,}15...0{,}2$ мм.

Противофильтрационные стенки глубиной 18...20 м выполняют открытым способом в виде траншей шириной 0,3...1 м или в виде подсекающих друг друга буровых скважин диаметром 0,6...1 м. Более глубокие — горным способом с проходкой шахт и штолен.

Для инъекционных завес обычно используют цемент с различными добавками, а в особых случаях: глинистые растворы (при больших поглощениях цемента или агрессивности подземных вод); недостаток — пониженная стойкость к суффозии; горячий битум (битумизация, битумные мастики, асфальтовые растворы до 200 °С), которые эффективны при раскрытии трещин $\delta>0{,}2...0{,}3$ мм и при агрессивных водах, недостаток — небольшой радиус распространения из-за быстрого остывания и твердения; холодные битумные эмульсии (диспергированный битум около 50% плюс водный раствор эмульгатора — гашеная известь, глина, трепел, суглинок, диатомит), которые эффективны при очень тонких трещинах.

В противофильтрационных стенках обычно применяют цементно-бентонитовые и глинистые растворы. Для стабильных суспензий применяют бетон и глины, содержащие не менее 30...40% глинистых частиц, с числом пластичности 18 и выше.

Понуры в гравитационных плотинах на скальных основаниях применяют редко из-за сложности ремонта уплотнений между понуром и плотиной при большой высоте последней.

Дренаж основания под плотиной устраивают следующих типов: вертикальный, наклонный, горизонтальный, комбинированный. В основаниях с небольшими градиентами фильтрации из-за возможной химической и механической суффозии дренаж не применяют. Основные характеристики дренажа см. таблицу 4.16.

Галереи предназначены для отвода дренажной воды, контроля за работой дрен и состоянием бетона, прокладки коммуникаций (электропроводка, воздуховоды, канализация), установки контрольно-измерительной аппаратуры, выполнения цементации швов и устройства цементационных завес, выполнения ремонтно-восстановительных работ. Бывают продольные (вдоль тела плотины) и поперечные (для отвода воды в НБ, иногда используют

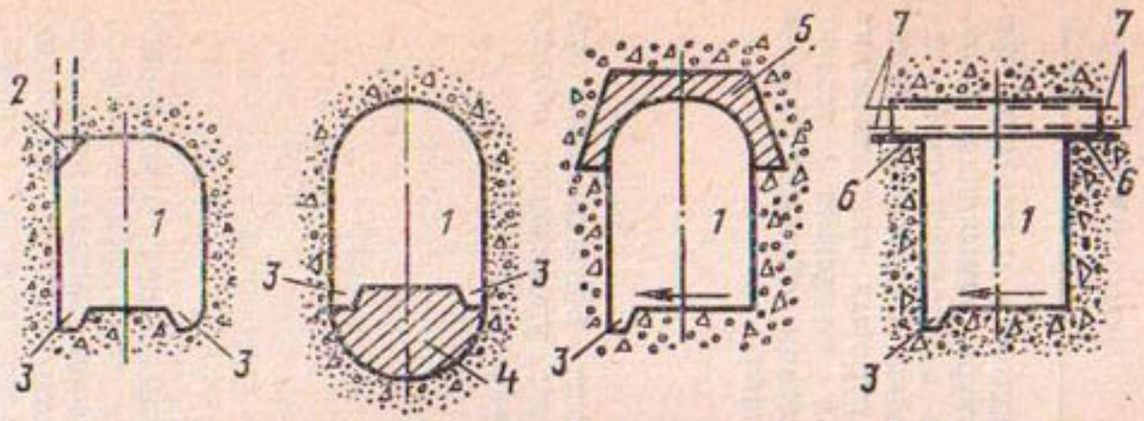


Рис. 4.11. Поперечные сечения галерей в теле плотины:

1 — галерея; *2* — вертикальные дрены тела плотины; *3* — кювет; *4* — бетон; *5* — сборное перекрытие; *6* — опорные плиты; *7* — арматура

как выходы из продольных галерей). По высоте плотины располагают через 15...40 м. При самотечном отводе воды нижние галереи следует размещать выше меженного уровня воды НБ (в противном случае предусматривают откачку). Поперечные сечения галерей приведены на рисунке 4.11. Минимальные размеры галерей: ширина $b=1{,}2$ м, высота $h=2$ м. Галереи, из которых выполняют цементацию основания (или тела плотины), имеют в зависимости от типа оборудования $b \geqslant 2...2{,}5$ м и h от 3...3,5 до 5 м. Пол галереи, предназначенной для сбора и отвода дренажной воды, имеет уклон $i \leqslant 0{,}025$ в сторону водосливного лотка или кюветов. В высоких плотинах иногда устраивают специальные смотровые галереи. При нескольких ярусах галерей (по высоте) их соединяют шахтами, в которых размещают лифты и маршевые лестницы, а из каждого нижележащего яруса в вышележащий — аварийные выходы не менее двух из каждой галереи на расстоянии друг от друга не более 300 м. Вертикальные шахты служат для размещения маршевых лестниц, грузопассажирских и грузовых лифтов.

Швы гравитационных плотин по характеру работы подразделяют на постоянные и временные. Постоянные, или конструктивные, швы обеспечивают независимые перемещения отдельных секций плотин в вертикальном и горизонтальном направлениях. Временные швы применяют для разрезки сооружения на блоки бетонирования в процессе строительства, и поэтому их обычно называют строительными. По конструкции швы бывают плоские; штрабовидные, называемые также шарнирными, штрабными (рис. 4.12); ломаные (чаще применяют в зданиях ГЭС), а по воспринимаемому напору — воспринимающие полный напор, подвергающиеся действию части напора, не подвергающиеся действию напора.

Плоские швы применяют наиболее часто, так как они просты в выполнении (проще опалубка, меньше расход материалов на ее изготовление); лучше отвод воды, профильтровавшейся в шов; работа секций независима друг от друга.

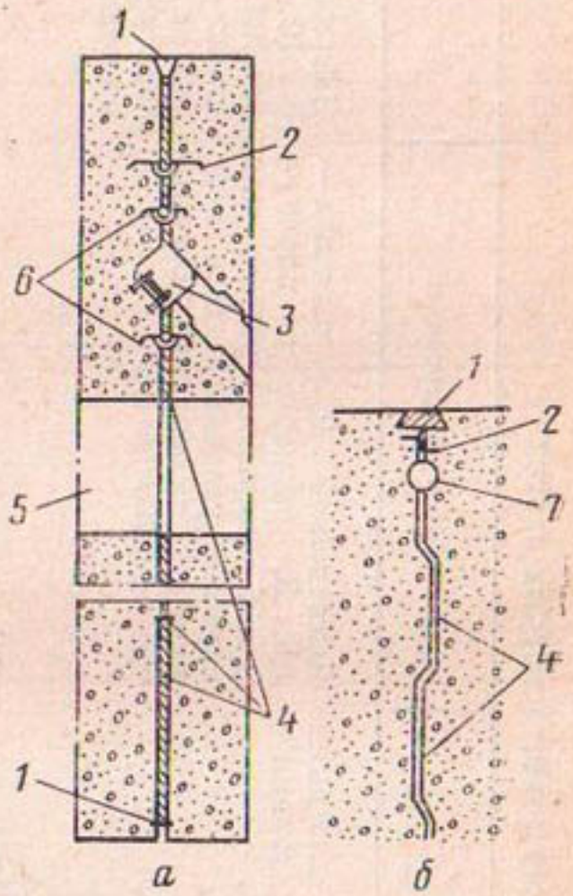
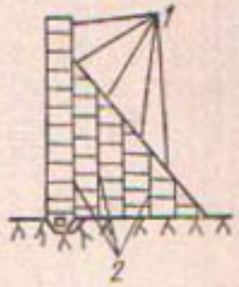
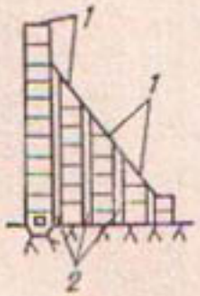
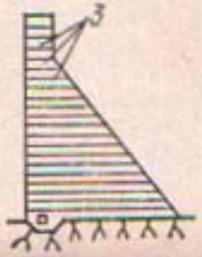
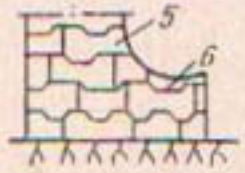
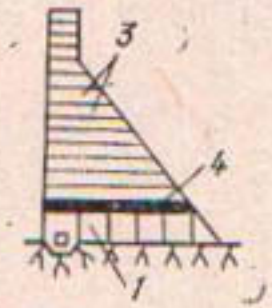
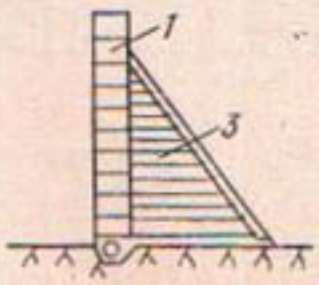


Рис. 4.12. Конструктивные швы гравитационных плотин:

а — плоский; *б* — штрабной; *1* — контурное наружное уплотнение; *2* — основное уплотнение (металлическое); *3* — смотровой колодец; *4* — шов; *5* — галерея; *6* — уплотнение вокруг колодца; *7* — дренаж

4.18. Типы разрезки гравитационных плотин

Тип разрезки	Размеры блоков, м	Преимущества	Недостатки
Столбчатая с плотными (цементируемыми) швами 	Высота $h=3...9$, у подошвы — 1,5...3; размеры в плане — 9...16 (меньший размер для суровых условий). Для нормальной цементации раскрытие шва $\delta \geqslant 0{,}5$ мм	Высокие темпы возведения — 8...10 м в месяц и более; удобна при возведении очередями; дополнительное обжатие напорной грани из-за температурных перемещений при возведении	Необходимость цементации при температуре замыкания швов, близкой к среднегодовой; искусственное охлаждение бетона. В суровых климатических условиях возможна только при местном обогреве бетона около шва
Столбчатая с объемными (бетонируемыми) швами 	Размеры блока аналогичны предыдущей разрезке. Швы плоские и штрабные	Независимое возведение отдельных столбов. Применение при любых климатических условиях. Искусственное охлаждение только в прискальной зоне и в оголовках. Омоноличивание швов при положительных и отрицательных температурах бетона в основных столбах	Сложность бетонирования узких швов; увеличение объема опалубки на 30...50%
Секционная 	Блоки с $h \geqslant 0{,}5...1{,}5$ (перерывы в бетонировании 3...5 сут). Блоки с $h=18...20$ (канадский тип, опасен разогрев от экзотермии, требует более жесткой опалубки)	Не требует цементации швов и искусственного охлаждения бетона до температуры замыкания; сокращается объем опалубки; более широкая механизация работ	Допустима при умеренном климате ($t=7...12$ °С). Увеличение зоны защемления блоков, повышающее требование к температурному режиму; сложность организации бетонных работ на большой площади; увеличение опасности пе-

			перерывов в бетонировании; освоение в начале строительства максимальной мощности бетонного завода
Вперевязку  	Блоки с $h=2...8$, у основания — 1...2; в плане 12...15. Перевязка шва — 0,3...0,5 для блоков высотой до 4, до 2...3 для более высоких. Возможны и горизонтальные штрабы	Темп возведения в высоту — 4 м в месяц. Не требует омоноличивания строительных швов; отсутствует искусственное охлаждение	Не применяют в суровом климате из-за интенсивного трещинообразования и для плотин высотой более 50 м (подвижки блоков затруднены значительными силами трения по горизонталям швов, что приводит к вертикальным сквозным трещинам)
Смешанного типа: столбчатая у основания и секционная на армопоясе  	Максимальные размеры блоков при столбчатой и секционной разрезке	Рациональное решение для самых высоких плотин. Не требует в начале строительства максимального объема бетонных работ и полной готовности системы температурного охлаждения	Устройство армопояса; высокие требования к последовательности работ и температурному режиму в нижней части плотины
столбчатая в верховой и секционная (или укатанный бетон) в низовой части плотины  			

Примечание. *1* — столбы; *2* — швы; *3* — длинные блоки; *4* — армопояс; *5* — блок бетонирования; *6* — штрабы.

Штрабовидные швы применяют при специальном обосновании в случае разнородного геологического строения основания; особенно эффективны они на склоновых участках и в узких каньонах с крутыми бортами. Недостатки штрабовидных швов: сложность изготовления, концентрации напряжений в местах перегибов, приводящие иногда к появлению трещин, худший отвод профильтровавшейся воды.

Строительные — вертикальные швы уменьшают опасность трещинообразования в строительный период, ко времени пуска в эксплуатацию их частично или полностью заделывают (цементируют или бетонируют).

Конструктивные (деформационные) швы по назначению разделяют на температурные, предотвращающие появление трещин при колебании температуры окружающей среды и при охлаждении бетона; усадочные, предотвращающие появление трещин усадки; осадочные, предотвращающие появление трещин от неравномерных осадок, вызванных различным весом секций, различиями свойств основания или резкими изменениями в очертании каньона. Обычно температурные, усадочные и осадочные швы совмещают и делают сквозными на всю высоту плотины.

Швы делят плотины по длине на секции (табл. 4.18). Размер секции зависит от температурного режима в период строительства и эксплуатации, геологии основания, очертания каньона, состава бетона, схемы бетонирования, пропуска строительного расхода. Размер секций от 7...8 до 15...22 м (есть предложения до 30 м). При суровом климате и широких секциях в середине их делают вертикальные швы-надрезы: по низовой грани на глубину до 2...4 м; в нижней части плотины — у подошвы (на период строительства, затем их цементируют).

Швы должны обладать достаточной водонепроницаемостью, иметь ширину, позволяющую отдельным секциям перемещаться независимо, а также создать возможность наблюдения за работой шва и ремонта уплотнения. Ширина швов зависит от геологии основания, размеров сооружения, колебаний температуры среды и приближенно равна

$$\Delta b = \alpha t (b_1 + b_2)/2,$$

где α — коэффициент линейного расширения бетона; t — изменение температуры окружающей среды в период строительства и эксплуатации; b_1 и b_2 — ширина двух смежных секций.

Предварительно ширину швов можно назначить, пользуясь рисунком 4.13.

4.19. Основные виды уплотнения швов

Вид уплотнения	Назначение	Материал для изготовления
Контурные наружные	Защита шва от воздействия льда, волн, засорения. Размещают со стороны ВБ (в основном) и НБ	Бетонные, железобетонные, деревянные (под водой) брусья, плиты, пробка, резиновая лента, стальные полосы, полимеры на подготовке из асфальтовых мастик и битумных матов
Внутренние	Ограждают галереи и внутренние полости, пересекающие швы. Располагают на расстоянии 0,2...0,5 м от поверхности полости	Металлические, резиновые, пластмассовые диафрагмы
Основные внутренние	Защита шва от напора. Размещают на расстоянии 1,5...2 м при температуре самого холодного месяца $t_m \geqslant -20$ °С, 2...2,5 м при $t_m < -20$ °С	Металлические, резиновые, пластмассовые диафрагмы, асфальтовые шпонки и прокладки, инъекционные уплотнения (цементация и битуминизация)

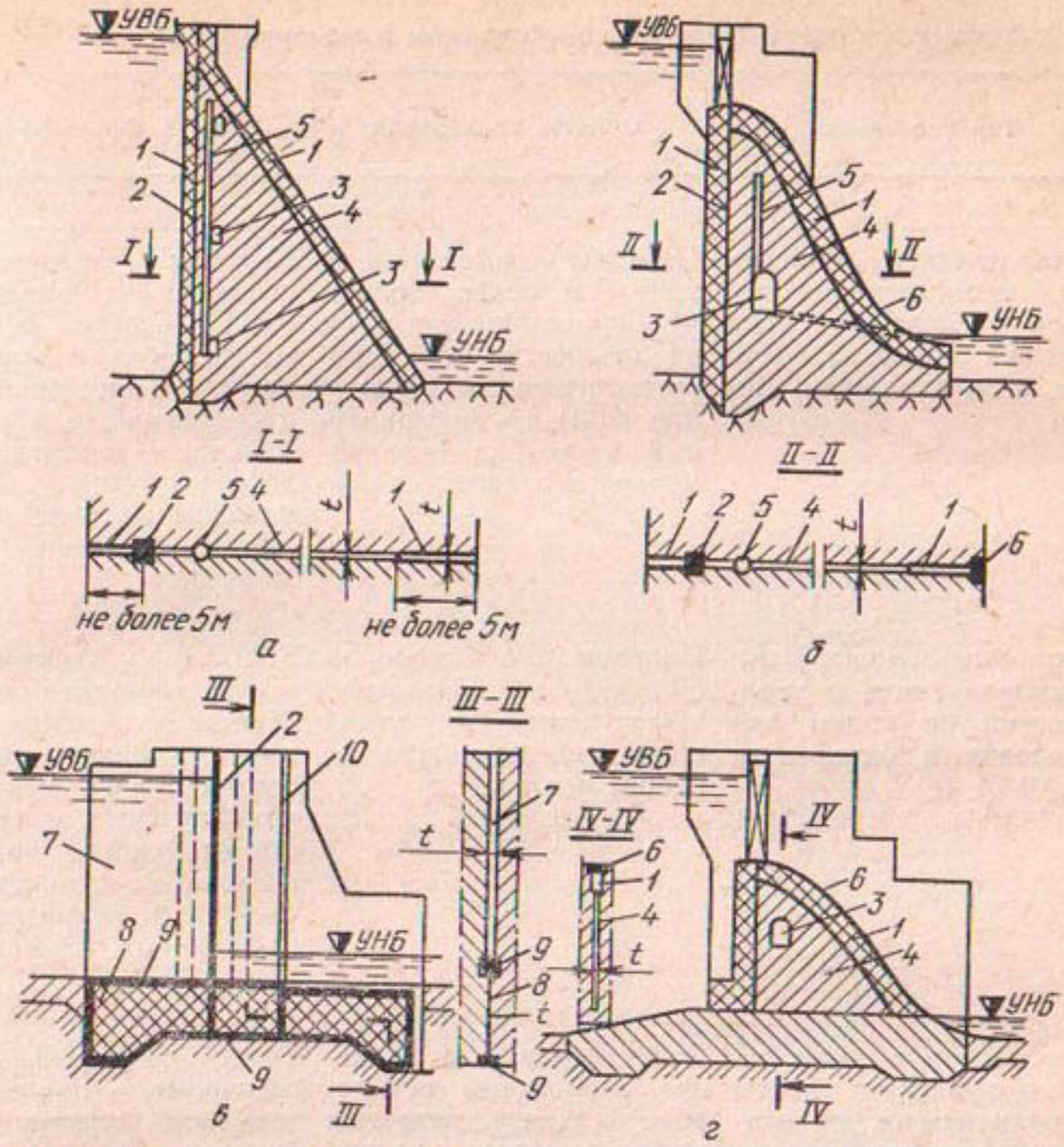


Рис. 4.13. Схемы расположения уплотнений в постоянных деформационных швах плотин на скальном (*а*, *б*) и нескальном (*в*, *г*) основаниях:

1 — шов, t=0,5...1 см; *2*, *6*, *9* — соответственно вертикальное, контурное и горизонтальное уплотнения; *3* — смотровая галерея; *4* — шов, t=0,1...0,3 см; *5* — дренажное устройство; *7*, *8* — швы t>5 см и t=1...2 см; *10* — смотровая шахта

Основные элементы шва (рис. 4.13): уплотняющие устройства, обеспечивающие водонепроницаемость; дренажные устройства — для организованного отвода воды, профильтровавшейся через уплотнение или в обход него (дрены, колодцы); вспомогательные устройства — запасные шахты, смотровые колодцы, устройства для доливки и прогрева асфальтового материала и др.

Способы устройства сквозных швов: многослойная штукатурка холодными асфальтовыми мастиками (ширина шва около 5...20 мм); наклейка одного или нескольких слоев рулонных гидроизоляционных материалов, в основном асфальтовых армированных матов или одного слоя асфальтовых плит (ширина шва до 20...40 мм). Последние используют для образования шва по контуру сооружения, обычно на глубину 2,5...3,5 м от верховой грани и 4...6 м от низовой. Для предотвращения схватывания соседних секций поверхность шва очередной секции покрывают разжиженными битумами, битумными эмульсиями и пастами, горячим битумом, асфальтовой мастикой, реже глиняным раствором; ширина шва до 5 мм.

Узкие швы-надрезы выполняют с помощью специальных опалубочных плит-оболочек или нанесением двух-трех наметов асфальтовой штукатурки на бетон первой очереди бетонирования.

4.20. Типы уплотнений швов по конструкциям и материалам

Тип уплотнения	Область применения	Общая характеристика
Металлические диафрагмы: низколегированные стали и сплавы, стойкие против коррозии (см. рис. 4.14, *а*): медь, латунь	Плотины высотой до 200 м и более. Толщину определяют расчетом на прочность от гидростатистического давления воды, на многократный изгиб, на неравномерность осадок секций	Высокая надежность, особенно с компенсаторами. Однако недостаточно гибки в нормальном к плоскости шва направлении, а в параллельном — недостаточно деформируемы. Наращивание их более сложно по сравнению с резиновыми
Резиновые диафрагмы: резиновая лента с утолщениями по краям для анкеровки в бетон (см. рис. 4.14, *а*)	Плотины с напором 50...250 м. Особенно эффективны в узких швах, где возможна их работа на сжатие	Высокая деформируемость (допускаемая деформация сдвига 127 мм, неравномерность осадки 5 см), недостатки — потеря эластичности от света, воздуха, низких температур; сложность ремонта; разрушение от агрессивных вод
Пластмассовые диафрагмы: профильные ленты из полиэтилена, поливинилхлорида, винипласта, полиамидов, неопрена, стеклопластиката, полиизобутилена и др. (см. рис. 4.14, *д*)	Конструкции и применение аналогичны резиновым. Для сквозных швов высоких плотин следует применять с осторожностью	Более долговечны, чем резиновые, однако со временем теряют эластичность
Асфальтовые шпонки: колодец, заполненный асфальтовой мастикой (битум с наполнителем) или бетонной смесью. Для предотвращения утечек мастики имеют верховые и низовые ограждения (на расстоянии 0,3...1,5 м) из диафрагм (см. рис. 4.14, *б*)	Шпонки малых размеров (15×15...30×30 см) в температурных швах; средние (40×40...60×60 см) — в швах шириной до 5 см; большие (80×150...170 см) — в швах шириной 10 см и более. Бывают треугольные (со стороной 25 см), шестигранные (со стороной 40 см), круглые (∅ = 10...20 см)	Обеспечивают надежную водонепроницаемость швов, надежны при осадках и сдвигах. Недостаток — сложность устройства, требует электропрогрев и автоматическое пополнение (или удаление) мастики из полости шва
Инъекционные: цементация (наиболее употребительна), битуминизация (см. рис. 4.14, *в*)	На всем протяжении шва или на его участке. Выполняют при температуре, близкой к среднегодовой	Цементация швов при их максимальном раскрытии позволяет отказаться от дренирования

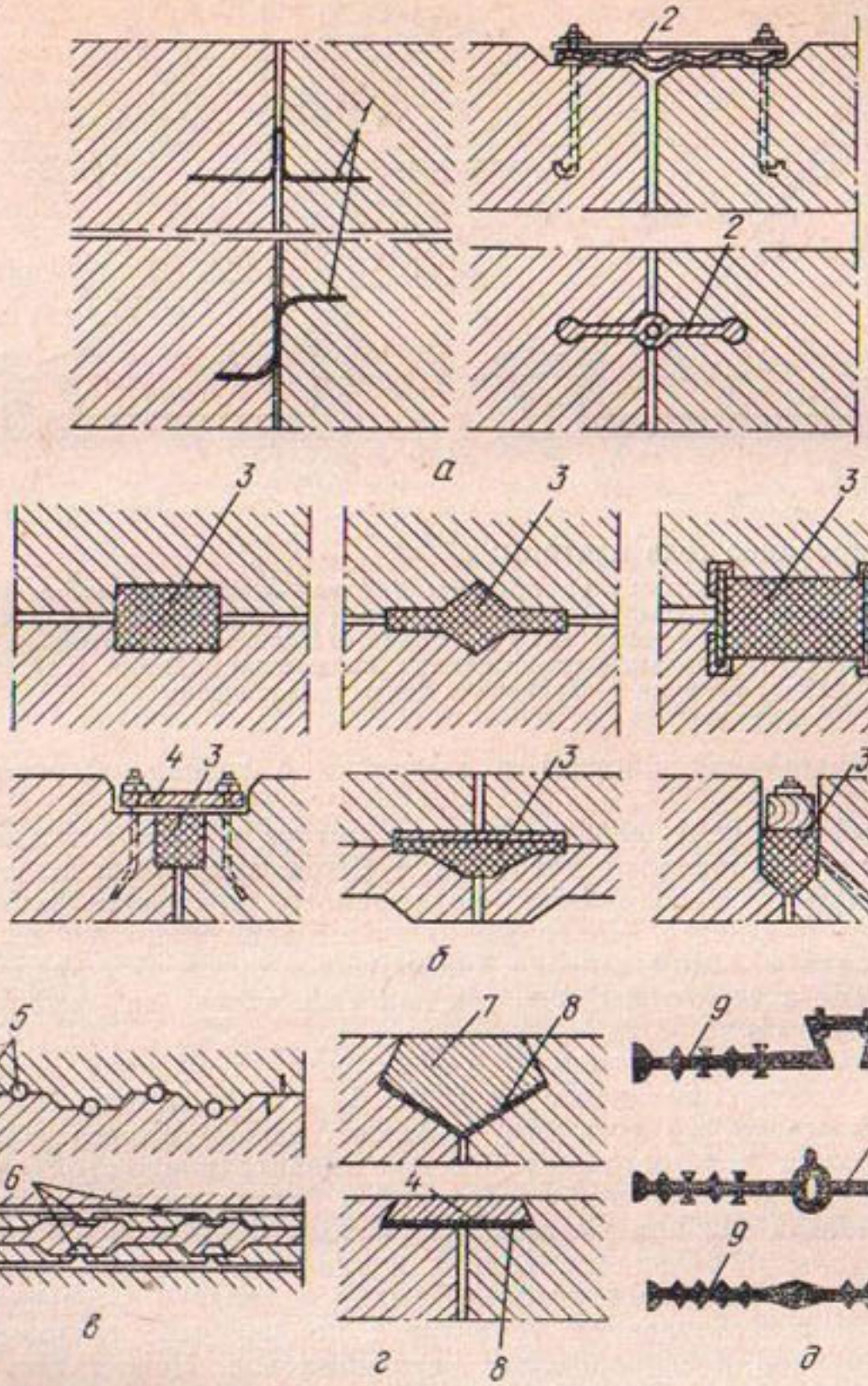


Рис. 4.14. Схемы основных уплотнений деформационных швов бетонных и железобетонных плотин:

а — диафрагмы из металла и резины; *б* — шпонки и прокладки из асфальтовых материалов; *в* — инъекционные уплотнения; *г* — брусья и плиты из бетона и железобетона; *д* — полимерные уплотнения; *1* — металлические листы; *2* — профилированная резина; *3* — асфальтовая мастика; *4* — железобетонная плита; *5* — скважины для цементации; *6* — цементационные клапаны; *7* — железобетонный брус; *8* — асфальтовая гидроизоляционная прокладка; *9* — профильная лента из пластика

Уплотнения швов (табл. 4.19, см. рис. 4.13) должны обеспечить многолетнюю безотказную водонепроницаемость швов. Основным элементом уплотнений являются диафрагмы и асфальтовые шпонки (табл. 4.20, рис. 4.14).

Дренажные устройства в деформационных швах для отвода воды, профильтровавшейся через шов или бетон, выполняют в виде вертикальных дрен — круглых ($d=15\ldots20$ см) или квадратных (20×20 см); в плотинах выше 50 м дрены используют в качестве смотровой шахты размером не менее 80×80 см. Последние можно использовать в качестве запасных шпонок, поэтому они должны иметь верховое и низовое ограждения. Дрены располагают на расстоянии 1 ... 1,5 м от основного уплотнения (или от низового

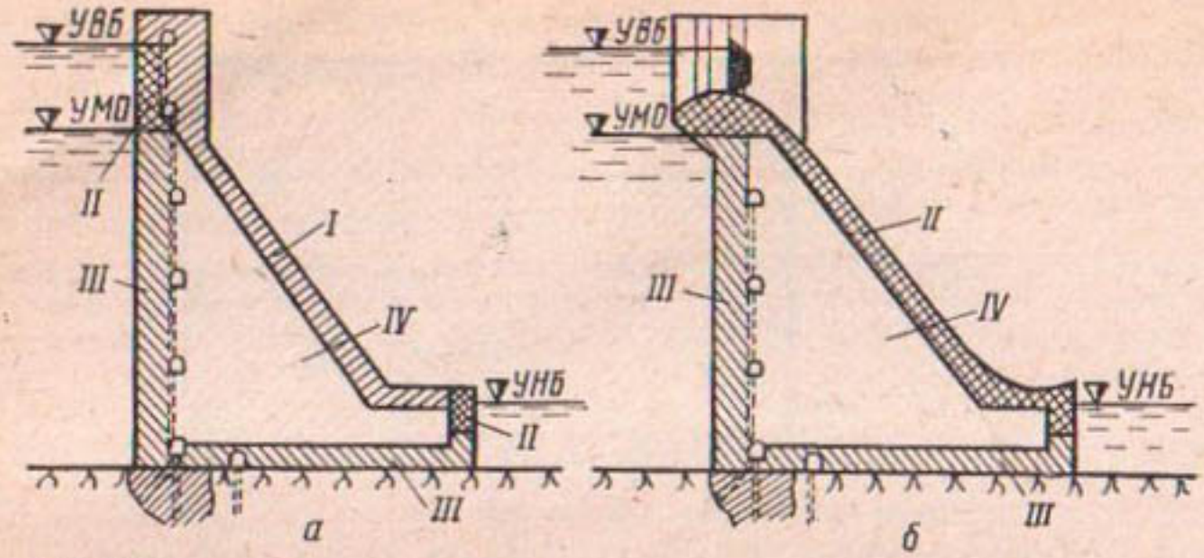


Рис. 4.15. Зонирование тела **плотины:**

а — глухая плотина; *б* — водосливная плотина; *I* зона — наружные части плотин и их элементы, находящиеся под воздействием атмосферы; *II* зона — наружные части плотины в пределах переменного уровня воды в бьефах; *III* зона — примыкающие к основанию и наружные части плотины, расположенные ниже минимальных эксплуатационных уровней воды в бьефах; *IV* зона — внутренняя часть тела плотины

ограждения асфальтовой шпонки) и соединяют с дренажной системой плотины.

Допускаемый градиент фильтрационного потока в бетоне около уплотнения $I_{cr} < 20$; глубину заделки диафрагм в бетон принимают в зависимости от напора воды и от необходимой протяженности пути фильтрации, исходя из допустимого градиента. Число рядов уплотнений различно по высоте и зависит от напора и длины заделки диафрагмы в бетон. Диафрагмы следует размещать ближе к верховой грани, так как сжимающие напряжения от давления воды и набухания здесь наибольшие.

Зональность укладки бетона. В зависимости от условий работы в отдельные части плотин при высоте их более 20 м укладывают бетон различных классов и марок, то есть его зонируют. Преимущества зональности: сокращение объема дорогостоящих бетонов (кавитационно-стойких, морозостойких и т. д.); удовлетворение требований к бетону различных по прочности и долговечности зон при уменьшении расхода цемента и применении более дешевых шлакопортландцементов и пуццолановых цементов; дешевле регулирование температурного режима кладки в связи с уменьшением расхода цемента и использованием цементов с пониженным тепловыделением; снижение требований к заполнителям различных зон. Недостатки: усложнение и увеличение объема бетонного хозяйства; некоторое снижение темпов работ. Экономическая эффективность зональности около 10...20% стоимости бетона сооружения; рациональна при различии расхода цемента в зонах примерно 10 кг на 1 м³ бетона.

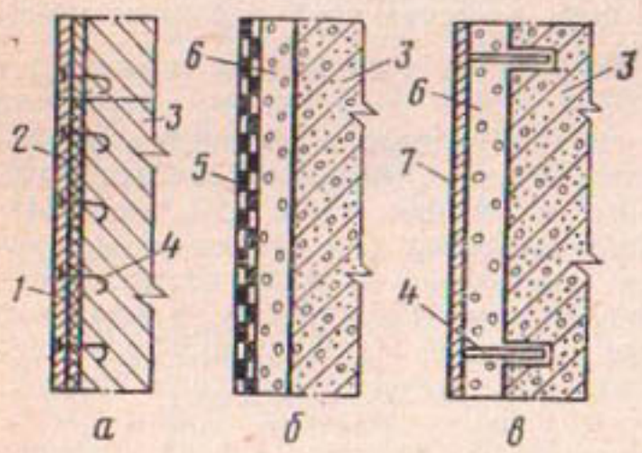


Рис. 4.16. Защитные покрытия плотин:

а — гидроизоляционный асфальтовый экран; *б* — полимерное теплогидроизоляционное покрытие, заливочное за скользящую опалубку; *в* — то же заливочное защитное ограждение; *1* — листовой асфальт; *2* — ограждающая стенка; *3* — бетон; *4* — анкер; *5* — армированная эпоксидная гидроизоляция; *6* — заливочный пенопласт; *7* — листовой металл

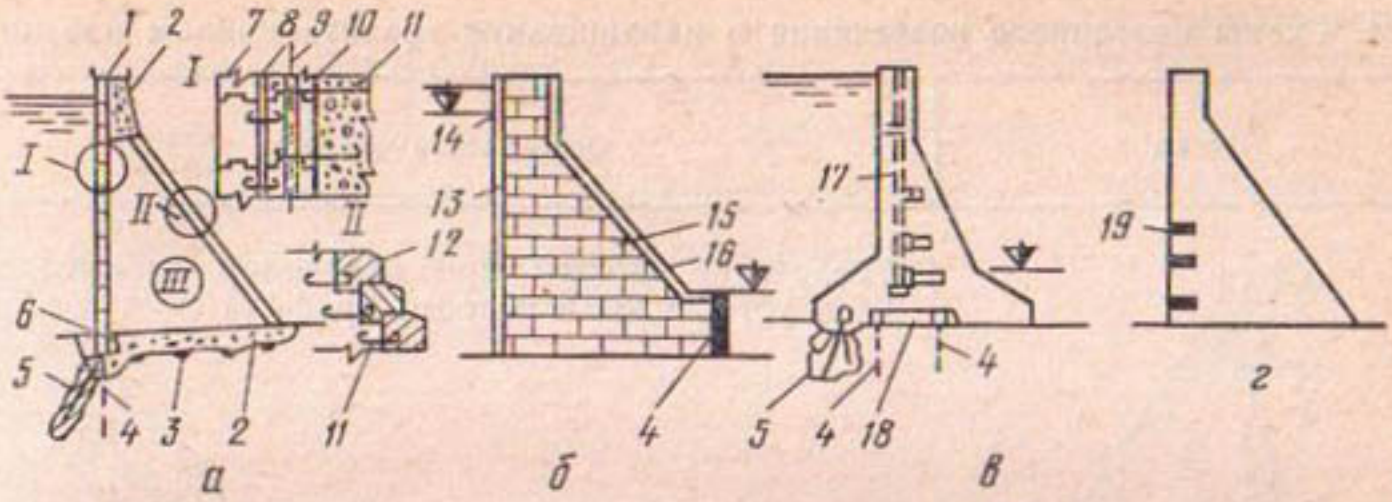


Рис. 4.17. Экономичные решения массивных гравитационных плотин:

а, б — плотина из малоцементного бетона; *в* — предварительно напряженная плотина без анкеровки в основании с комбинированным дренажем; *г* — плотина с прокладками из полимербетона; *I, II* — облицовка напорной и низовой граней; *III* — укатанный малоцементный бетон; *1* — сборные элементы гребня; *2* — массивный бетон; *3* — горизонтальные дрены; *4, 5* — дренажная и противофильтрационные завесы; *6* — галерея; *7* — внешние сборные плиты; *8* — битумная заливка; *9* — дрены; *10* — внутренние сборные плиты с дренами; *11* — анкера; *12* — сборные элементы низовой грани; *13* — гидроизоляция; *14* — теплогидроизоляция; *15* — малоцементный бетон с нарезкой швов специальной машиной; *16* — железобетонная опалубка; *17* — пучки арматуры в крупногабаритных каналах; *18* — горизонтальный дренаж; *19* — полимербетонные низкомодульные вставки

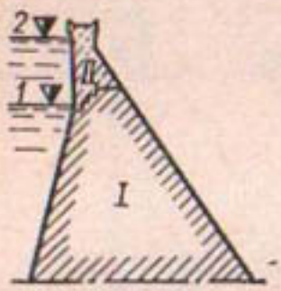
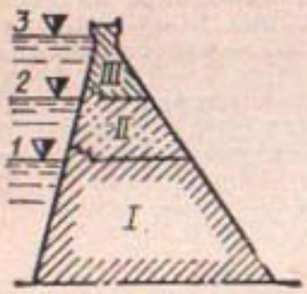
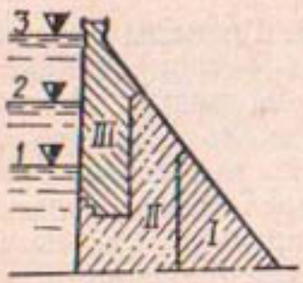
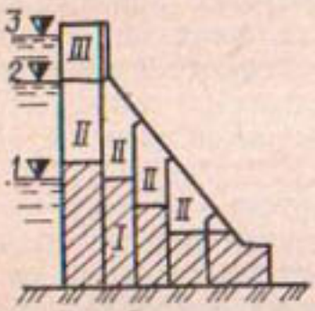
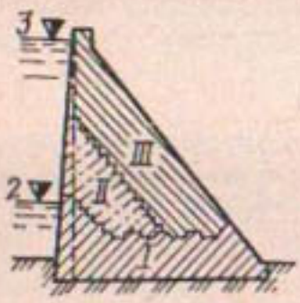
Различают четыре зоны в теле плотины (рис. 4.15). Границы зон располагают исходя из общей разбивки профиля на блоки бетонирования: при столбчатой разрезке толщина зоны морозостойкого бетона равна длине блока, при бетонировании длинными блоками составляет около 3...4 м, в общем случае ширина любой зоны больше или равна 2 м. Число классов и марок бетона в плотине должно быть не больше четырех, применение большего числа требует специального обоснования. Рекомендуемые классы бетона для различных зон плотин рассмотрены в п. 2.8.

Защитные покрытия граней плотины (рис. 4.16) служат для предохранения от разрушения при высокой фильтрации агрессивных вод, высоких перепадов температуры, а также для защиты зон переменного уровня в ВБ и НБ. В обычных условиях служит «зональный» бетон; при укладке его на гранях плотины можно не предусматривать специальных мероприятий. Низовые грани, как правило, защитных покрытий не имеют.

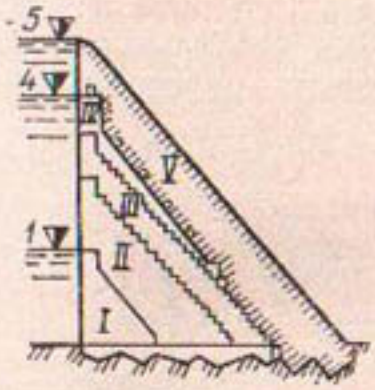
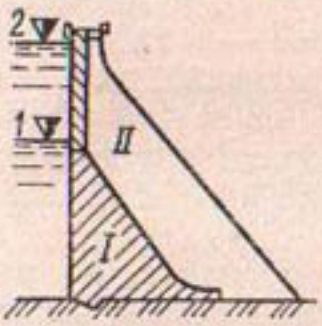
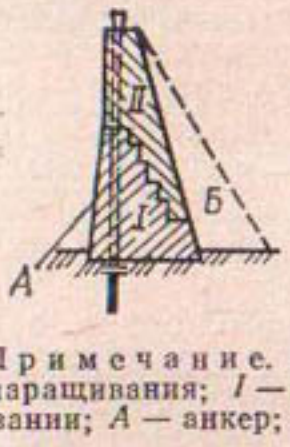
Поэтапное возведение и наращивание гравитационных плотин. Оно получило повсеместное распространение в советской и зарубежной практике благодаря высокому экономическому эффекту. Технические решения по наращиванию плотин делят на два типа: без применения предварительного напряжения; с применением предварительно-напряженной анкеровки. Основные схемы, получившие применение при строительстве плотин, приведены в таблице 4.21. При поэтапном возведении плотин необходима четкая проработка схемы производства работ, учет напряженного состояния тела плотины, в том числе от температурно-усадочных воздействий.

Пути усовершенствования и снижения стоимости гравитационных плотин. Технологические мероприятия предусматривают: зональное распределение бетона; учет изменения свойств бетона во времени; использование заполнителей максимальной крупности; применение поверхностно-активных, а также тонкодисперсных минеральных добавок для замены части цемента; применение жестких бетонных смесей; использование полностью механизированных поточных методов бетонирования, сочетающих высокую интенсивность с предотвращением трещинообразования. Из методов укладки бетона представляют интерес: послойная укладка бетона от берега до берега с нарезкой межсекционных швов; с секционной разрезкой — токтогульский; с укладкой малоцементного бетона и нарезкой швов в слоях с $h \approx 1{,}5$ м (рис. 4.17, *а*); с укладкой укатанного малоцементного бетона (содержание вяжущего компонента во внутренних зонах 95 . . . 105 на 1 м³, из них цемента около

4.21. Схемы поэтапного возведения и наращивания гравитационных плотин

Схема	Особенности процесса
	Увеличение высоты при некотором избытке запаса устойчивости старого профиля
	При возведении плотины горизонтальными слоями
	Уширение в сторону ВБ тремя этапами без перерыва в эксплуатации
	Поэтапное возведение при столбчатой разрезке
	Уширение в сторону НБ; нижнюю часть возводят во всю ширину, что не всегда экономично
	Наращивание со стороны обоих бьефов

Продолжение

Схема	Особенности процесса
	Наращивание наклонными слоями
	Наращивание с помощью контрфорсов, на которые опирается железобетонная плита (вертикальная, наклонная), или массивный оголовок
	Наращивание с применением напряженной анкеровки

Примечание. *1* — начальный уровень воды ВБ; *2...5* — уровни воды ВБ на этапах наращивания; *I* — начальный профиль плотины; *II...V* — профили плотины при наращивании; *А* — анкер; *Б* — экономия бетона.

60...80 кг, остальное зола уноса; бетон укладывают от берега до берега слоями 30...60 см и укатывают виброкатками).

Конструктивные мероприятия: устройство плотин с экранами (металлическими, железобетонными или полимерными); замена части бетона камнем или водой (последнее при параметрах сдвига больше 0,65...0,7, если определяющим для плотины будет условие устойчивости, а не напряженное состояние); обжатие верховой грани с помощью анкеровки, соответствующей разрезки швами или наклоном напорной грани (или ее нижней части) в сторону ВБ (рис. 4.17, *в*) с уклоном 0,14...0,125; регулирование напряженного состояния устройством надрезов на верховой, иногда и на низовой гранях, вместо надрезов возможно устройство разгружающих низкомодульных полос, например из полимербетонов (рис. 4.17, *г*), низкомодульных прокладок в основании, укрепительной цементации под низовой гранью при разномодульных массивах в основании $E_2 < E_1$; повышение несущей способности и устойчивости плотины, что обеспечивается наклоном подошвы (или ее части) в сторону ВБ, устройством зуба или штрабных поперечных швов.

Состав расчетов гравитационных плотин. Бетонные плотины рассчитывают по методу предельных состояний. По первому предельному состоянию проводят расчеты сооружения на общую прочность и устойчивость, а также на местную прочность его элементов; по второму — расчеты основания на местную и фильтрационную прочность, расчеты сооружения по образованию трещин и деформациям, а также по раскрытию строительных швов в бетонных и трещин в железобетонных конструкциях. Основы расчетов рассмотрены в п. 2.3...2.6.

4.3.3. ВОДОСБРОСНЫЕ БЕТОННЫЕ И ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫЕ ПЛОТИНЫ

Бетонные водосбросные плотины (водосливные плотины, плотинные водосбросы) можно возводить на скальных и нескальных основаниях. Плотины на нескальных основаниях возводят более распластанными и большего веса, чем на скальных, так как у них сопротивление сдвигу в 1,5 ... 4 раза меньше сопротивления сдвигу по скале, а допускаемые нагрузки на нескальное основание существенно меньше, чем на скальное. Экономически целесообразны плотины высотой 40 ... 50 м.

Конструкции водосбросных плотин приведены в таблице 4.22. Выбор типа водосбросной плотины обусловлен тремя факторами: действующим напором и возможностями форсирования уровня ВБ; топографическими и геологическими условиями створа гидроузла и условиями компоновки его основных сооружений; условиями строительства и принятым способом пропуска строительных расходов.

Основные схемы *подземного контура* водосбросных плотин на нескальных основаниях приведены в таблице 4.23, а типы понуров — в таблице 4.24.

Для плотин IV класса понур устраивают преимущественно из местных материалов (суглинков, глин, торфа, разложившегося не менее чем на 50%). При слабых основаниях допускается устройство бетонных понуров без гидроизоляционного покрытия, толщину которого определяют по $l_{cr,m}$, для бетона $l_{cr,m}=30$.

Схема водосливной плотины с анкерным понуром показана на рисунке 4.18. Подготовка основания под понур: для понуров из местных материалов при песчаных и супесчаных основаниях — уплотнение поверхности основания; при крупнообломочных грунтах основания — песчаный переходной слой толщиной не менее 10 см; для бетонного и анкерного понуров — уплотнение поверхности основания и укладка слоя бетона толщиной 5 ... 10 см; для понуров из асфальтовых и полимерных материалов — укладка слоя щебня или гравия, пропитанного битумом, или бетона слоем 5 ... 10 см.

При отсутствии понура предусматривают устройство верхового подплотинного *шпунта.*

Понурный шпунт устраивают в основном при анкерном понуре, а водобойный перфорированный — при специальном обосновании. Основные характеристики шпунтов даны в таблице 4.25. Если висячие (не забитые в водоупор) шпунты находятся на расстоянии друг от друга меньшем, чем суммарная длина обоих (или менее 0,75 этой величины в исключительных случаях), то эффективность гашения фильтрационного потока резко падает. В водоупор шпунт должен быть забит не менее чем на 1 м.

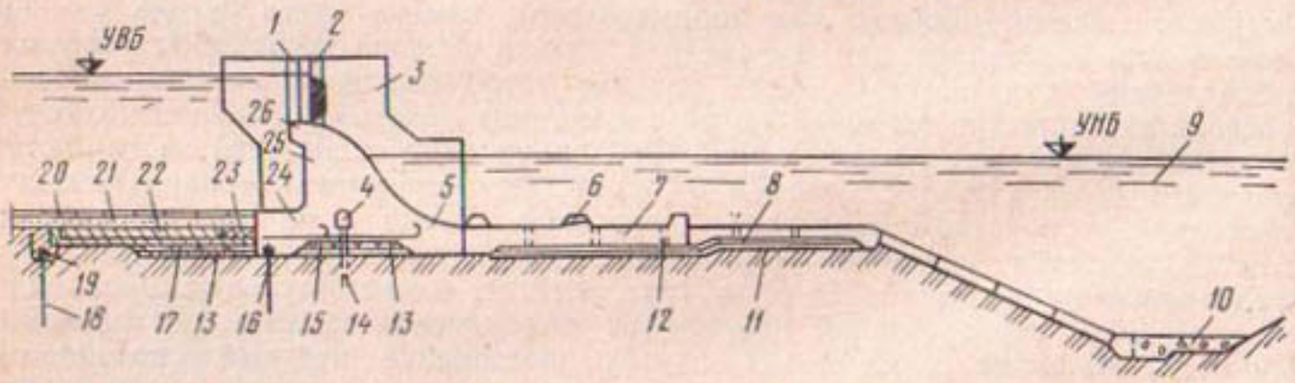
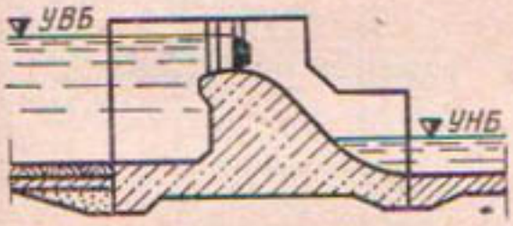
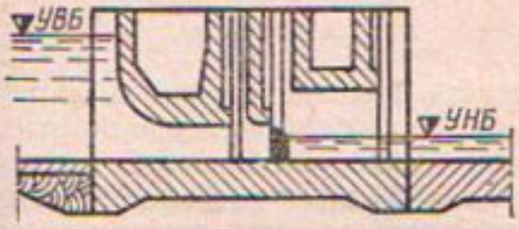
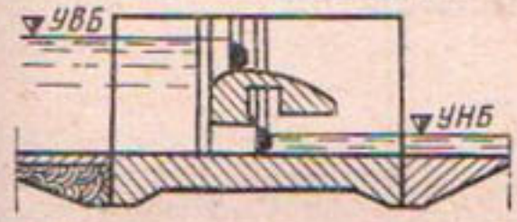
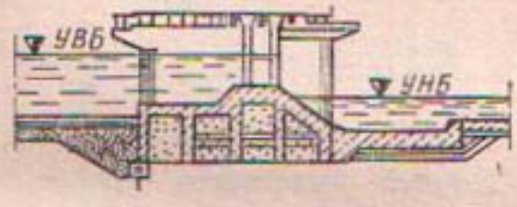
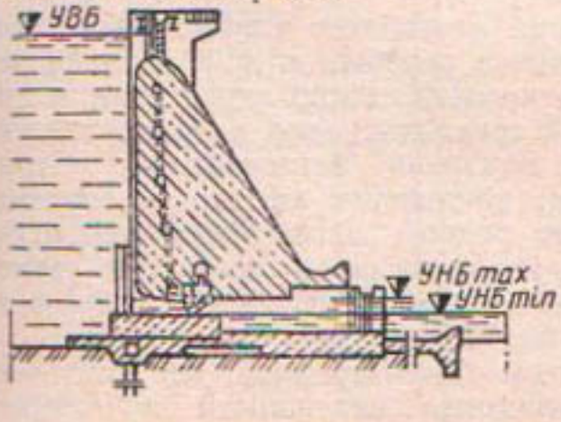
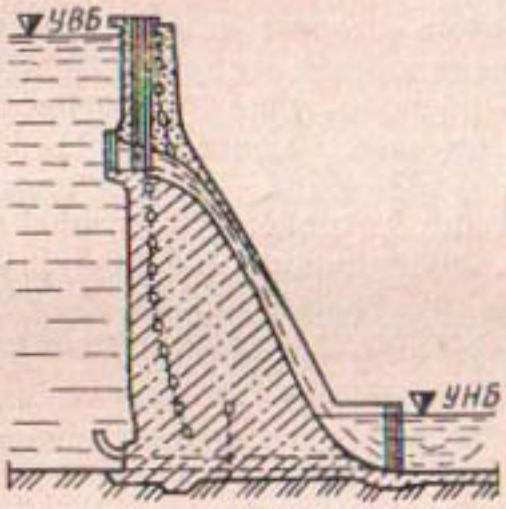
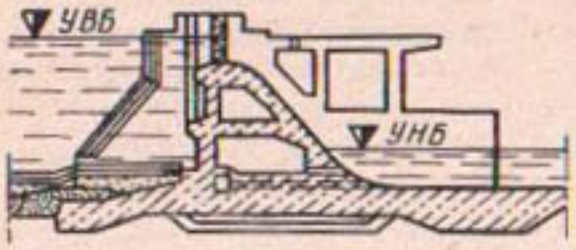
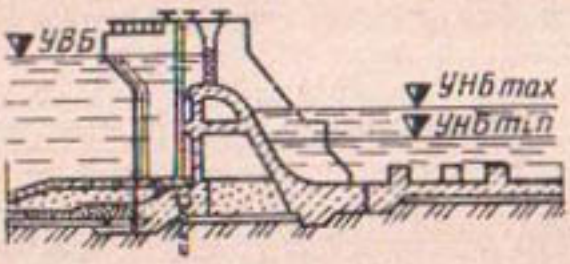


Рис. 4.18. Водосливная плотина с анкерным понуром на нескальном основании:

1, 2 — пазы ремонтного и основного затворов; *3* — промежуточный бык; *4* — дренажная галерея; *5* — низовой участок фундаментной плиты; *6* — гасители энергии; *7* — водобой; *8* — рисберма; *9* — предохранительный ковш; *10* — переходное деформируемое крепление; *11* — горизонтальный дренаж водобоя и рисбермы; *12* — дренажные колодцы; *13* — обратный фильтр; *14* — вертикальный дренаж основания; *15, 17* — горизонтальный дренаж фундаментной плиты и понура; *16* — верховой подплотинный шпунт; *18* — понурный шпунт; *19* — надшпунтовая балка; *20* — крепление пригрузки; *21* — пригрузка понура; *22* — анкерный понур; *23* — гибкий участок анкерного понура; *24* — верховой участок фундаментной плиты; *25* — водослив; *26* — гребень водослива

Тип и схема	Условия применения
Низкопороговые	
Распластанная плотина с поверхностным переливом 	Русловые створы плотин низко- и средненапорных гидроузлов. Береговое расположение водосбросов в этих случаях менее целесообразно из-за увеличения объема земляных работ по устройству котлована плотины, подводящего и отводящего каналов, а также из-за ухудшения гидравлических условий работы плотины
С донными отверстиями 	То же
Двухъярусная с поверхностным переливом и донными отверстиями 	»
Ячеистая 	»
Высокопороговые	
Водосливы сплошного профиля: с поверхностным переливом и глубинным водосбросом 	Плотины на пойме или в рукаве реки. Большие глубины в ВБ и значительные напоры облегчают условия подвода воды к плотинам, практически снимают ограничения, связанные с пропуском льда, так как он тает в водохранилище. По конструкции близки к глухим плотинам

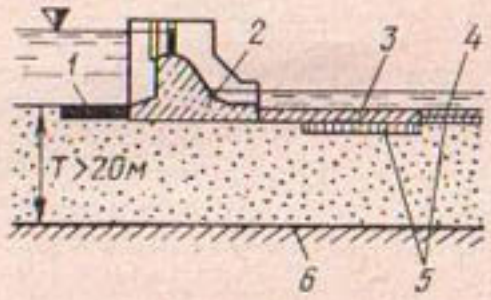
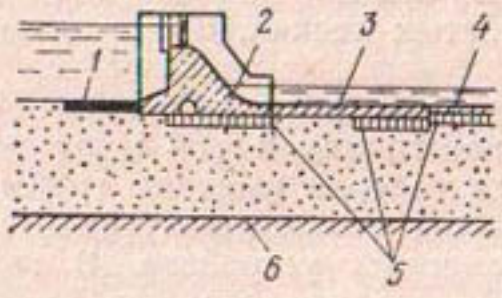
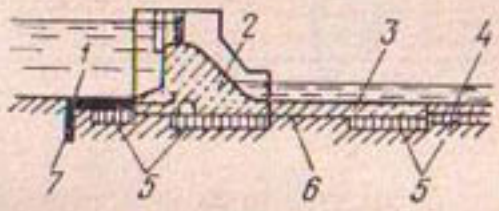
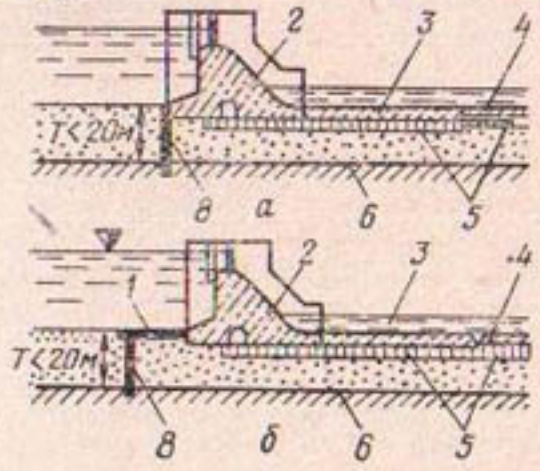
Тип и схема	Условия применения
с глубинными отверстиями и движением по потолку галереи 	То же
Водосливы пустотелой конструкции: с массивной фундаментной плитой 	Область применения та же при возможности облегчения плотины, сохранив ее устойчивость и прочность. Объем бетонной кладки уменьшают за счет пригрузки водой консоли фундаментной плиты. Недостаток — сильное армирование фундаментной плиты
с тонкой анкерной плитой, пригруженной гравийно-песчаным грунтом 	То же

Качественные завесы из деревянного шпунта выполнить трудно, так как они водопроницаемы, щелисты, поэтому применяют их значительно реже завес из стального и железобетонного шпунта. При соединении с фундаментной плитой плотины головы шпунтовых стенок заделывают в специальные шпонки, размещенные в бетонном массиве фундамента. Пластичные мастики, залитые в эти шпонки, позволяют фундаментам плотин перемещаться, не зависая на шпунтах и не деформируя их.

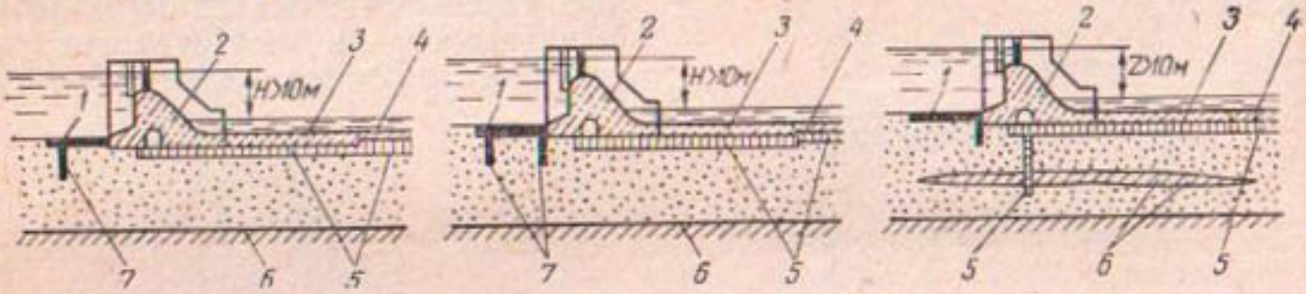
Зубья, стенки, завесы используют, когда устройство шпунтов невозможно (наличие валунов, скальных пород, стволов деревьев и др.). Для их устройства используют различные методы; открытый способ возведения в котлованах с креплением откосов и откачкой грунтовых вод; вибропогружение или подмыв пустотелых кольцевых свай; подводное бетонирование в траншеях, выполненных подводным черпанием; применение кесонов и опускных колодцев (в настоящее время применяют редко); нагнетанием цементных и цементно-глинистых растворов в песчаные и песчано-гравелистые грунты большой проницаемости. Из условий производства работ ширина зуба понизу равна 3 м и более, глубина 2...3 м и более.

Толщина противофильтрационной завесы $t_c = \Delta H_c \gamma_n / I_{cr,m}$, где ΔH_c — потеря напора в сечении завесы; γ_n — коэффициент надежности по грунту;

4.23. Основные схемы подземного контура водосливных плотин на нескальных основаниях

Конструкция и схема подземного контура	Область применения
Бездренажная фундаментная плита и понур 	Плотины на песчаных основаниях при глубоком (более 20 м) залегании водоупора и необходимости удлиненного подземного контура
Горизонтальный дренаж под фундаментной плитой 	Плотины на песчаных основаниях при глубоком (более 20 м) залегании водоупора и необходимости специальных мер по снижению фильтрационного давления
Горизонтальный дренаж под фундаментной плитой с понуром и понурным шпунтом 	Плотины на основаниях, содержащих глинистые грунты и требующих для обеспечения устойчивости устройства анкерного понура
Вертикальная преграда, пересекающая водопроницаемое основание на всю глубину с понуром (*а*) и без него (*б*) 	При залегании водоупора на глубине не более 20 м. Устройство понура необязательно

Конструкция и схема подземного контура	Область применения
Сочетание понура, вертикальной преграды, не доходящей до водонепроницаемого слоя, и дренажа за вертикальной преградой	Плотины с напором более 10 м, возводимые на средних по проницаемости грунтах, а также при наличии маловодопроницаемых оболочек



Примечание. *1* — понур; *2* — плотина; *3* — водобой; *4* — рисберма; *5* — горизонтальный дренаж; *6* — маловодопроницаемый грунт; *7* — понурный шпунт; *8* — вертикальная преграда.

$I_{cr,m}$ — критический средний градиент напора на завесе, равный 4 в мелкозернистых песках, 5 — в средне- и крупнозернистых песках, 6 — в гравийно-галечниковых грунтах.

Дренажная сеть — обычно система вертикальных дрен диаметром 15 ... ... 20 см, располагаемых через 2 ... 3 м, на расстоянии 2 ... 4 м от напорной грани. Дрены выводят в галереи. В эти же галереи выводят трубы дренажей, расположенных под фундаментной плитой, оснащенные задвижками для управления работой дренажей и расходомерных устройств. В галереях, расположенных ниже уровня воды в НБ, предусматривают принуди-

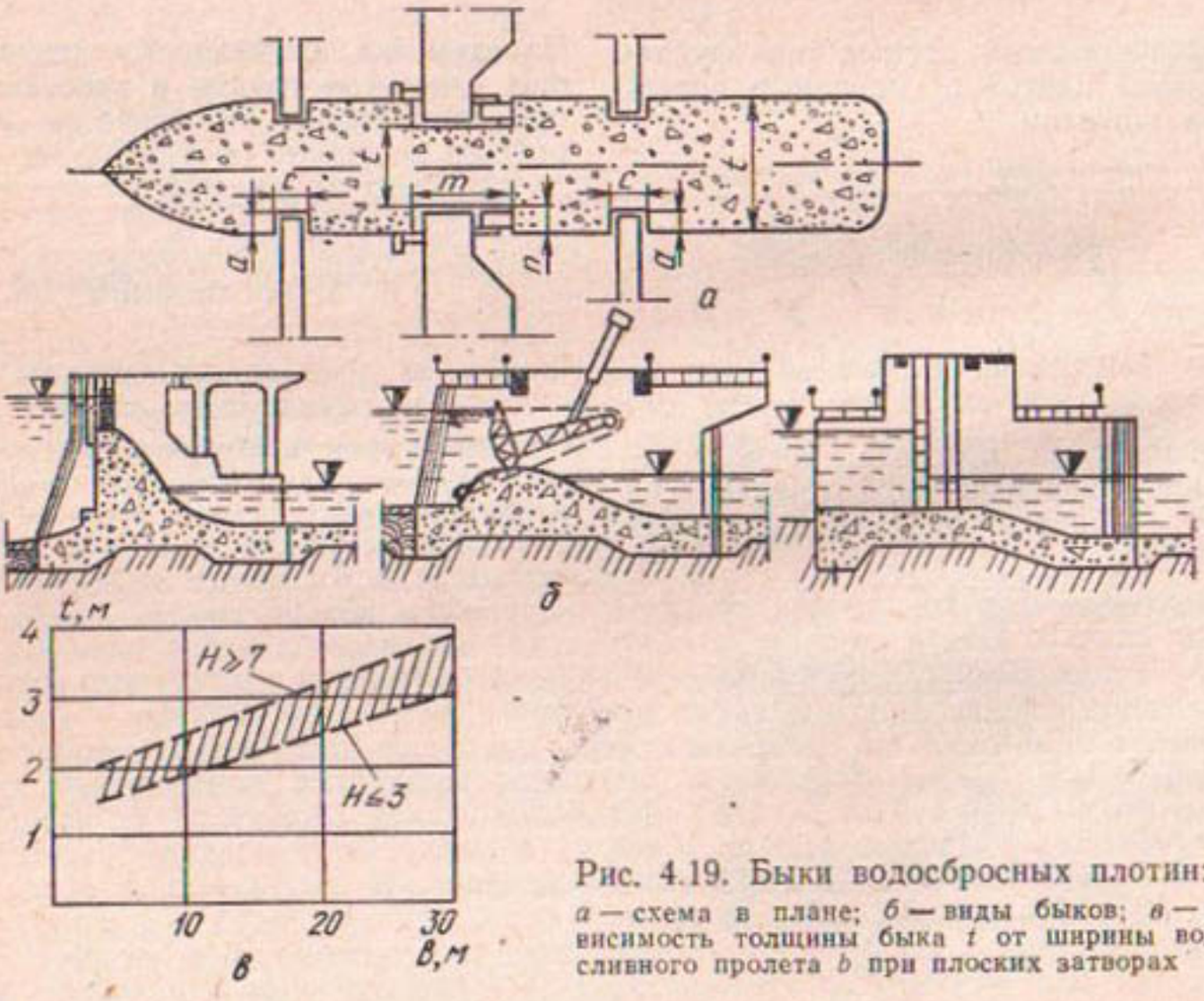


Рис. 4.19. Быки водосбросных плотин:
а — схема в плане; *б* — виды быков; *в* — зависимость толщины быка *t* от ширины водосливного пролета *b* при плоских затворах

4.24. Характеристика понуров водосбросных плотин

Тип понура		Материал понура	Область применения	Размеры понура	Сопряжение с плотиной
по водопроницаемости	по конструкции				
Маловодопроницаемые $k<10^{-3}$ м/с (в 50 и более раз меньше k основания)	Гибкие	Глины, суглинки, торф	Грунты основания песчаные, супеси; напор до 15 м	Длина от 1...1,5 H до 2,5 H. Толщина в любом сечении: $t_a \geqslant \Delta H_{ua}\gamma_n/I_{cr,m}$, где ΔH_{ua} — потеря напора от начала подземного контура м; $I_{cr,m}$ — критический градиент фильтрации через понур (глины — 6...8, суглинок — 4...5); $t_{a,min}=0{,}5$ м в начале и 1...2 м у плотины; γ_n см. п. 2.6	Для предупреждения трещин или щелей (щель шириной 1 см полностью выводит понур из строя) шов сопряжения делают наклонным, в понур вводят уплотнения в виде гибких матов
		Глинобетон (глина 20...25%, песок 30...40%, гравий 35...40%), асфальт	То же, но напор более 15 м		
Водонепроницаемые	Гибкие	Полимерные пленки	Глинистые грунты	Несколько слоев рулонного гидроизоляционного материала	В сопряжениях предусматривают уплотнение (см. рис. 4.14)
	Жесткие	Бетонные или железобетонные плиты с уплотнениями в швах и гидроизоляцией	Глинистые грунты; напор до 15 м	Длина та же. Толщина плит 0,4...0,7 м. Сечение арматуры определяют расчетом устойчивости плотины на сдвиг	Продольную арматуру заделывают в фундаментную плиту плотины. В сопряжениях предусматривают уплотнения для обеспечения водонепроницаемости при любых деформациях. Уплотнения выполняют из любых гидроизоляционных материалов с применением компенсаторов и шпонок
	Анкерные (см. рис. 4.18)	Железобетонные плиты с гидроизоляцией по поверхности из битумных и полимерных материалов	Глинистые грунты; напор более 15 м	Размеры понура определяют специальным расчетом	То же

Примечание. Для предохранения от промерзания поверх грунтовых понуров отсыпают обратный фильтр каменной отмосткой толщиной 0,15...0,2 м и более, покрываемый креплением из бетонных плит (толщиной 0,2...0,5 м) или каменной отмосткой.

4.25. Размеры и материал шпунтов

Вид шпунта	Глубина погружения	Способ погружения	Материал и размеры
Верховой	0,15...1,5 H	Забивка, вибрирование	Сталь (длина 12...25 м, толщина 8...10 мм); железобетон (толщина 0,1...0,5 м, ширина 0,5...0,6 м); дерево (толщина 0,18...0,22 м, глубина забивки 6...7 м)
Понурный	2...2,5 H	Подмыв	
Водобойный	2...4 м	То же	

тельную откачку воды эжекторами, питаемыми водой из ВБ (производительность эжектора с диаметром сопла 15 мм — 2...3 л/с).

Быки водосливных плотин (рис. 4.19) служат опорами затворов и мостов (служебных и транзитных); на них размещают подъемные механизмы затворов и строения для них. В плотинах с развитыми консолями фундаментной плиты быки устраивают на всю длину этой плиты (вдоль по потоку): они выполняют роль ребер жесткости. Форма и толщина быков зависят от технологических требований размещения пазов затворов, подкрановых путей, мостов; размещения выходов из галерей тела плотины и др. Со стороны ВБ быки имеют вертикальное или наклонное, удобообтекаемое водой ребро; для размещения мостов со стороны ВБ иногда устраивают нависающую консоль. С низовой стороны бык делают обычно с уступом или с наклонным ребром, так как отметку его верха принимают на 1...2 м выше максимального уровня НБ. Мосты со стороны НБ размещают либо на консолях, либо на специальных эстакадах.

Толщину быков ориентировочно можно назначить по зависимости, представленной на рисунке 4.19, *в*. Неразрезные быки на 1...1,5 м тоньше разрезных за счет того, что пазовый перешеек t_0 не может быть тоньше 1...1,5 м (см. рис. 4.19, *а*). Минимальная конструктивная толщина неразрезных быков — 2...2,5 м. Остальные размеры могут быть назначены с учетом следующих рекомендаций: $a \approx c \approx 0{,}5$ м; $n = 0{,}5m \approx 0{,}7...2$ м; $m = 0{,}14...0{,}1\,b \approx 1...4$ м (b — пролет водосливного отверстия). Пазы затворов обычно размещают на линии гребня водосливного оголовка. В быке располагают закладные части затворов. Бетонировать быки можно в опалубке из плит-оболочек, армопанелей, облицовочных бетонных блоков.

Устои обеспечивают благоприятные условия подхода потока к водосливу и плавное бессбойное растекание в НБ; способствуют предупреждению возникновения размывов дна, берегов и тела грунтовых плотин в обоих бьефах; обеспечивают надежное в фильтрационном отношении сопряжение бетонной плотины с грунтовой (или с берегом). Различают сопрягающие и разделяющие устои (табл. 4.26).

Часть грунтовой плотины или берега, примыкающие к сопрягающему устою, выполняют с уширенной в плане площадкой для производства ремонтных работ, выезда транспорта и кранов, размещения шандорохранилищ. Длина площадки по фронту плотины равна 1,5...2,5 длины водосливных пролетов.

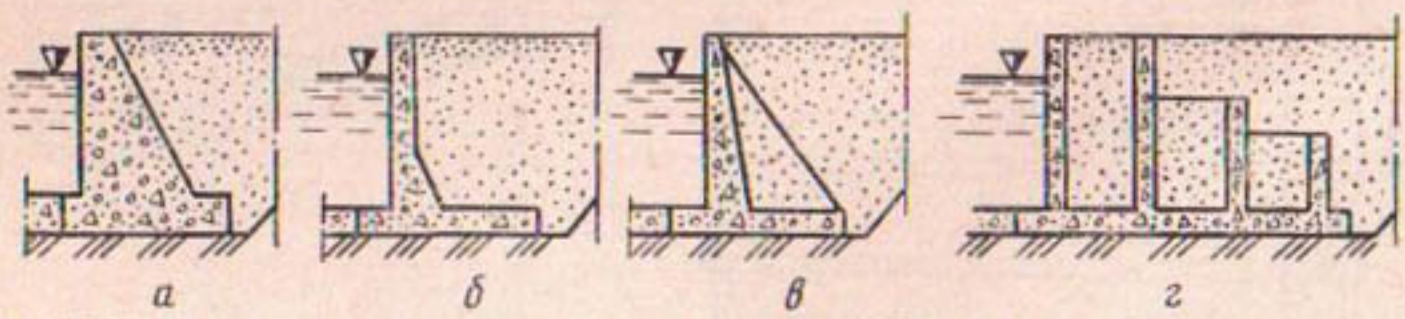
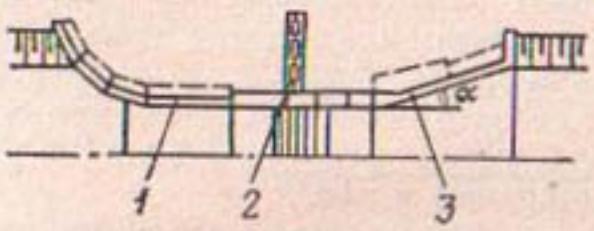
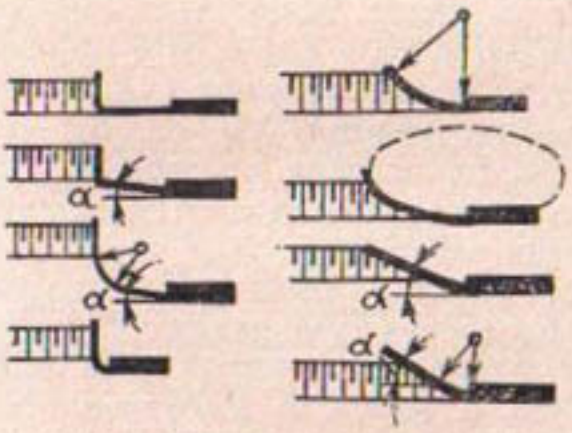
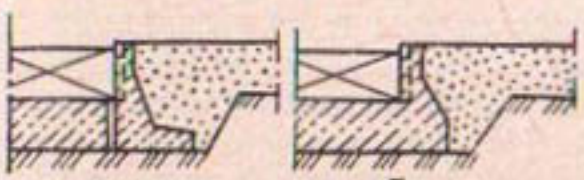
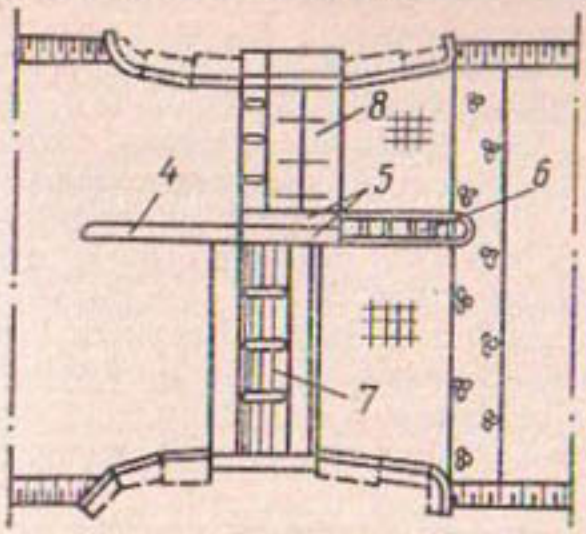


Рис. 4.20. Типы подпорных стенок устоев водосбросных плотин:
а — массивная подпорная стенка; *б* — уголковая; *в* — контрфорсная; *г* — ячеистая

4.26. Конструктивные особенности устоев водосбросных плотин

Схема, тип устоя и составных элементов	Назначение и особенность конструкции
Сопрягающий: 	Сопряжение водосбросной плотины с грунтовой или берегом (береговой устой)
верховая стенка 	Формирует поток на подходе к водосливу. Форма в плане различна, для низкопороговых — криволинейная. В вертикальной плоскости — стенки постоянной высоты или «ныряющие» (требуют усиления крепления откоса и менее благоприятны по условиям фильтрации)
продольная часть  а б	Объединена с береговым пролетом в одну конструкцию (*б*), от плотины отделяется деформационным швом (*а*)
низовая стенка	Устраивают либо в одной плоскости с продольной частью, либо с расширением на угол α (от 6...8 до 10...12°)
противофильтрационный элемент	Шпунт, диафрагма, стенка
Раздельный (раздельные стенки) 	Отделяет водосбросную часть плотины от глухой. Включает смежные полубыки плотины и ГЭС, раздельные пирсы с верховой и низовой стороны

Примечание. *1, 3* — верховая и низовая сопрягающие стенки; *2* — продольная часть; *4, 6* — верховая и низовая сторона плотины; *5* — полубыки плотины и ГЭС; *7* — плотина; *8* — ГЭС.

Верховую и низовую сопрягающие стенки конструктивно выполняют в виде подпорных стенок (рис. 4.20). Стенки и их фундаментные плиты разрезают деформационными швами на секции длиной от 20 до 30 м. При выполнении противофильтрационных мероприятий (шпор) важно обеспечить надежный контакт между тыловой гранью устоя и грунтом засыпки (см. рис. 4.20). В последнем должны полностью отсутствовать фильтрационные деформации, грунт засыпки должен быть тщательно уплотнен. При высоких плотинах часть глухой бетонной плотины, заканчивающуюся диафрагмой, вдвигают в тело грунтовой плотины; при низких плотинах шпоры делают в виде железобетонных и шпунтовых диафрагм; при плотинах средней высоты продольную часть устоя выполняют ячеистой конструкции с примыканием к ней диафрагмы. Тыловую поверхность устоя для улучшения прилегания грунта делают слабонаклонной с заложением 1 : 10.

Длину раздельного устоя устанавливают по результатам модельных гидравлических исследований, и она составляет от 300 до 1500 мм. Для улучшения условия обтекания лобовую грань устоя очерчивают по круговой, эллиптической или лемнискатной кривой.

Глубинные водосбросные отверстия выполняют в теле плотины с круглым или прямоугольным сечением. Размеры отверстия устанавливают гидравлическими расчетами с учетом существующей стандартизации (см. гл. 5). Ширина отверстия по условиям прочности плотины не должна превышать 50% расстояния между постоянными межсекционными швами для плотин высотой более 60 м; 60% того же расстояния для плотин ниже 60 м. Для увеличения пропускной способности входным отверстиям следует придавать плавные очертания. На выходном участке площадь отверстия уменьшают для улучшения гидравлических условий и сокращения размеров затворов. Ось водосброса, как правило, назначают прямолинейной в плане, а высотное положение и наклон оси оголовка водосброса — исходя из конструктивных соображений и с учетом диапазона колебания уровней в ВБ. Для предупреждения воронкообразования отверстие заглубляют под уровень на большую глубину, чем минимальное заглубление $d_{min}=0{,}52v_m h^{0.5}$, где v_m — средняя скорость в водосбросе, м/с; h — высота отверстия за оголовком, м. Если камера затворов размещена в начальной или средней части водосброса, необходимо предусматривать подвод воздуха за затворы. По всей длине тракта глубинного водосброса необходимо выполнить прогноз кавитации и при необходимости предусмотреть соответствующие противокавитационные мероприятия. В отдельных случаях выполняют высокопороговые плотины с комбинированными водосбросами (см. табл. 4.22).

Соросбросные отверстия имеют пролет не более 10 м. Минимальный напор на водосливе из условий пропуска сора — не менее 3 м, а из условий пропуска льда — не менее $1{,}5\delta+0{,}15$ м, где δ — максимальная по натурным наблюдениям толщина льдин в период ледохода.

Основные рабочие затворы размещают на гребне водосливного оголовка или в начале водоската; аварийно-ремонтный затвор — на расстоянии не менее 1,5 . . . 2 м от основного для проведения ремонтных работ в пространстве между затворами.

Разрезку плотины швами (рис. 4.21) — в большинстве случаев осуществляют по быкам, чтобы избежать неравномерных осадок быков одного пролета и не допустить заклинивания затвора. Как правило, разрезку делают через один — три пролета. Максимальное расстояние между деформационными швами может составлять 40 . . . 50 м и более. При длине пролетов водосливных отверстий более 25 м предусматривают устройство температурных швов (швов-надрезов). Их глубину доводят до фундаментной плиты (см. рис. 4.21). Для исключения навала одной секции на другую при неравномерных осадках ширину деформационного шва у гребня принимают 4 . . . 5 см, у фундаментной плиты — 1 . . . 1,5 см. Ширина швов-надрезов — 1 . . . 2 см.

Конструкции швов и их уплотнений для водосбросных плотин аналогичны гравитационным (см. рис. 4.12 . . . 4.14).

Выбор класса бетона и зонирование по объему бетонной кладки водосбросных плотин на скальных и нескальных основаниях сходны как между собой, так и с глухими гравитационными плотинами. Обычно водосливная

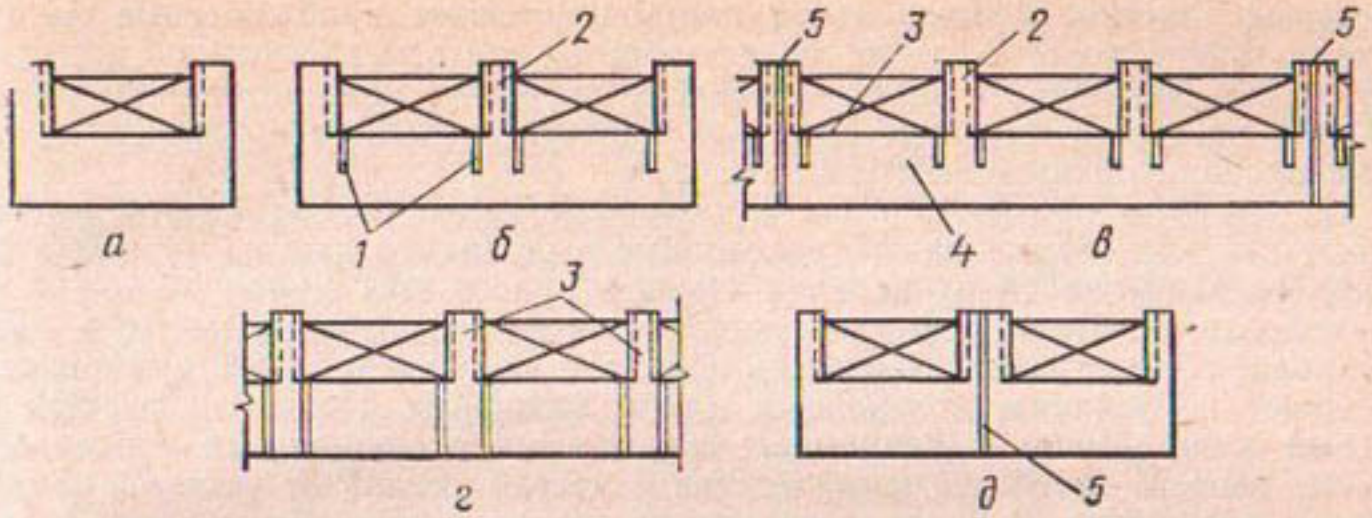


Рис. 4.21. Разрезка водосбросных плотин швами:
а — однопролетная; *б* — двухпролетная; *в* — трехпролетная; *г* — быки отрезаны от водослива; *д* — шов между двумя однопролетными секциями; *1* — швы-надрезы; *2* — бык; *3* — порог водослива; *4* — фундаментная плита; *5* — швы между секциями

грань бывает сложена более плотным бетоном повышенных классов, что делает ее более стойкой против истирания наносами и льдом. В отдельных наиболее тяжелых случаях применяют облицовку этой грани тесаным камнем, сталебетоном, чугуном и др.

Особенности расчетов водосбросных плотин. Длину водосливного фронта устанавливают на основе технико-экономического сравнения вариантов в увязке с требуемым удельным сбросным расходом и условиями пропуска льда через водосброс (последнее для низкопороговых плотин, см. гл. 5).

Удельный расход в НБ водосбросных плотин определяют при предварительных расчетах равенством

$$q = 1{,}73 v_{adm1} h_r^{1,2} \approx 1{,}7 v_{adm1} h_{max}^{1,2} \qquad (4.2)$$

где v_{adm1} — неразмывающая скорость грунта основания в НБ за водосбросом при глубине 1 м, м/с; h_r — глубина потока на рисберме при наибольшем расчетном расходе, м; h_{max} — глубина размыва за рисбермой.

На мягких грунтах удельные расходы назначают от 35 до 75 м³/с на 1 м в зависимости от качества грунта. Скальные грунты позволяют назначать большие удельные сбросные расходы — 100...300 м³/с на 1 м и более. Повышение удельного сбросного расхода дает возможность сократить длину водосливного фронта, но ведет к увеличению длины и глубины водобойного колодца (или возрастанию числа гасителей на водобое), а также к увеличению размывов за креплением.

Высоту тела плотины (высота водослива) при заданном напоре устанавливают в зависимости от компоновочного решения всего гидроузла, общей схемы сооружения, геологии основания, возможной отметки дна водобоя, принимаемой схемы пропуска строительных расходов и др.

Число пролетов зависит от типа затворов, расчетного обоснования пропускной способности, стоимости водосброса при различных пролетах между быками, а также условия пропуска льда. При плоских и сегментных затворах наиболее целесообразны пролеты шириной 16...20 м; при малом числе пролетов — большие пролеты до 30...35 м с сегментными затворами. По условиям пропуска льда на реках южных районов и реках, текущих с севера, ширину пролетов назначают не менее 10 м, а на северных реках и реках, текущих с юга на север, — не менее 18 м.

Верховой, низовой и средний (при наличии полостей в теле) *участки фундаментной плиты* высокопороговой плотины рассчитывают на местную прочность как контурные плиты. Рассчитав общую прочность секции плотины в продольном направлении, проверяют сечения с учетом продольной арматуры и схемы ее расстановки. Фундаментные плиты низкопороговых плотин рассчитывают на усилия, полученные из расчета общей прочности ее секции. При большой неравномерности нагрузок и значительной разности в толщине

отдельных участков фундаментной плиты применяют приближенные методы расчета: плиту условно делят на продольные полосы, работающие как самостоятельные элементы и воспринимающие нагрузку, непосредственно приходящуюся на них. Внутренние силы при этом распределяют по расчетным полосам пропорционально моментам инерции.

На местную прочность *быки и полубыки* водосбросных плотин рассчитывают как консольные плиты, заделанные в фундаментную плиту или в водослив (в зависимости от наличия температурного шва между быком и телом водослива). Быки донных водосбросов рассчитывают на местную прочность как стойки рамы. Прочность быков и полубыков и их армирование проверяют по усилиям, полученным для водосливных плотин, из расчета на местный изгиб быков и полубыков; для плотин с глубинными водосбросами — из расчета на общий изгиб секции с учетом усилий от местного изгиба быков и полубыков. В направлении вдоль потока быки работают как балки-стенки, в которых максимальные сжимающие напряжения от изгиба сконцентрированы в средней зоне, что позволяет ограничить в расчетах рабочее сечение быка треугольной зоной, имеющей основание на фундаментной плите, а наклонные отсекающие плоскости под углом 45° к вертикалям, проходящим по границам быка. Растяжение в пазовых перешейках проверяют расчетом для двух возможных схем: напряжение в бетоне по всей высоте перешейка не превышает предела прочности на растяжение; напряжения в верхней части пазового перешейка превышают предел прочности бетона на растяжение.

4.3.4. КОНТРФОРСНЫЕ ПЛОТИНЫ

Конструкции контрфорсных плотин. Основные типы *контрфорсных плотин* и их конструктивные элементы даны в таблице 4.27. В последние годы чаще строят массивно-контрфорсные плотины (рис. 4.22). Формы контрфорсов и напорных перекрытий показаны на рисунке 4.23.

Плоские перекрытия контрфорсных плотин даны на рисунке 4.24. Для определения толщины напорных плит плоских перекрытий рекомендуется график, представленный на рисунке 4.25.

Контрфорсы многоарочных плотин аналогичны контрфорсам плотин с плоскими напорными перекрытиями. Для невысоких плотин (до 10 м) на нескальных основаниях рекомендовано (МГМИ) устройство контрфорсов на свайных ростверках (рис. 4.26).

Противофильтрационные мероприятия для контрфорсных плотин: дренаж оголовка (при опасности промерзания низовой стороны) или полость (используется для отвода избытка тепла при строительстве). Дренаж основания обосновывают фильтрационными исследованиями. Противофильтрационные завесы из полостей между контрфорсами в основании рекомендуют выполнять для плотин III, IV, иногда II классов, из галереи в нижней части напорного перекрытия — для I класса.

Цементационные завесы предусматривают для оснований, сложенных грунтами с $k \geqslant 0{,}1$ м/сут; в слабо- или водонепроницаемых грунтах их уст-

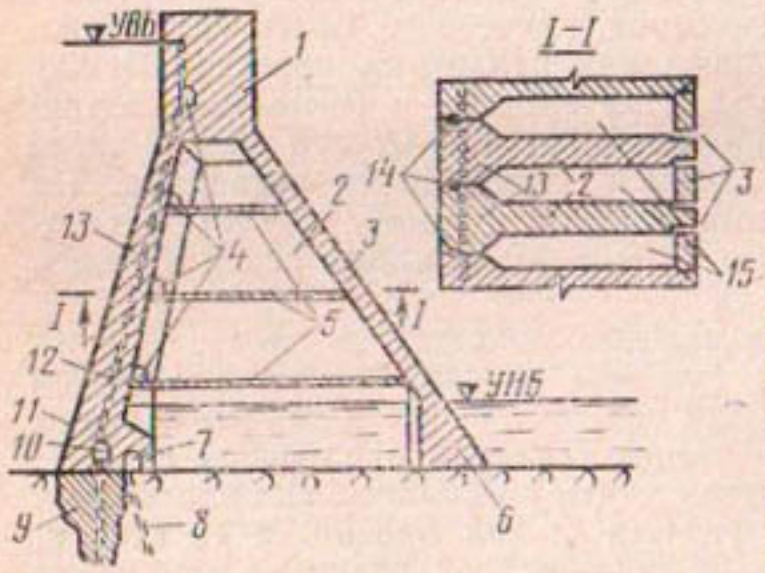


Рис. 4.22. Массивно-контрфорсная плотина:

1 — гребень; *2* — контрфорс; *3* — низовое перекрытие; *4* — смотровые галереи; *5* — перекрытия полостей; *6* — низовой клин; *7* — дренажная галерея; *8* — дренаж основания; *9* — противофильтрационная (обычно цементационная) завеса; *10* — цементационная галерея; *11* — верховой клин; *12* — дренаж плотины; *13* — массивный оголовок; *14* — противофильтрационные уплотнения; *15* — полости

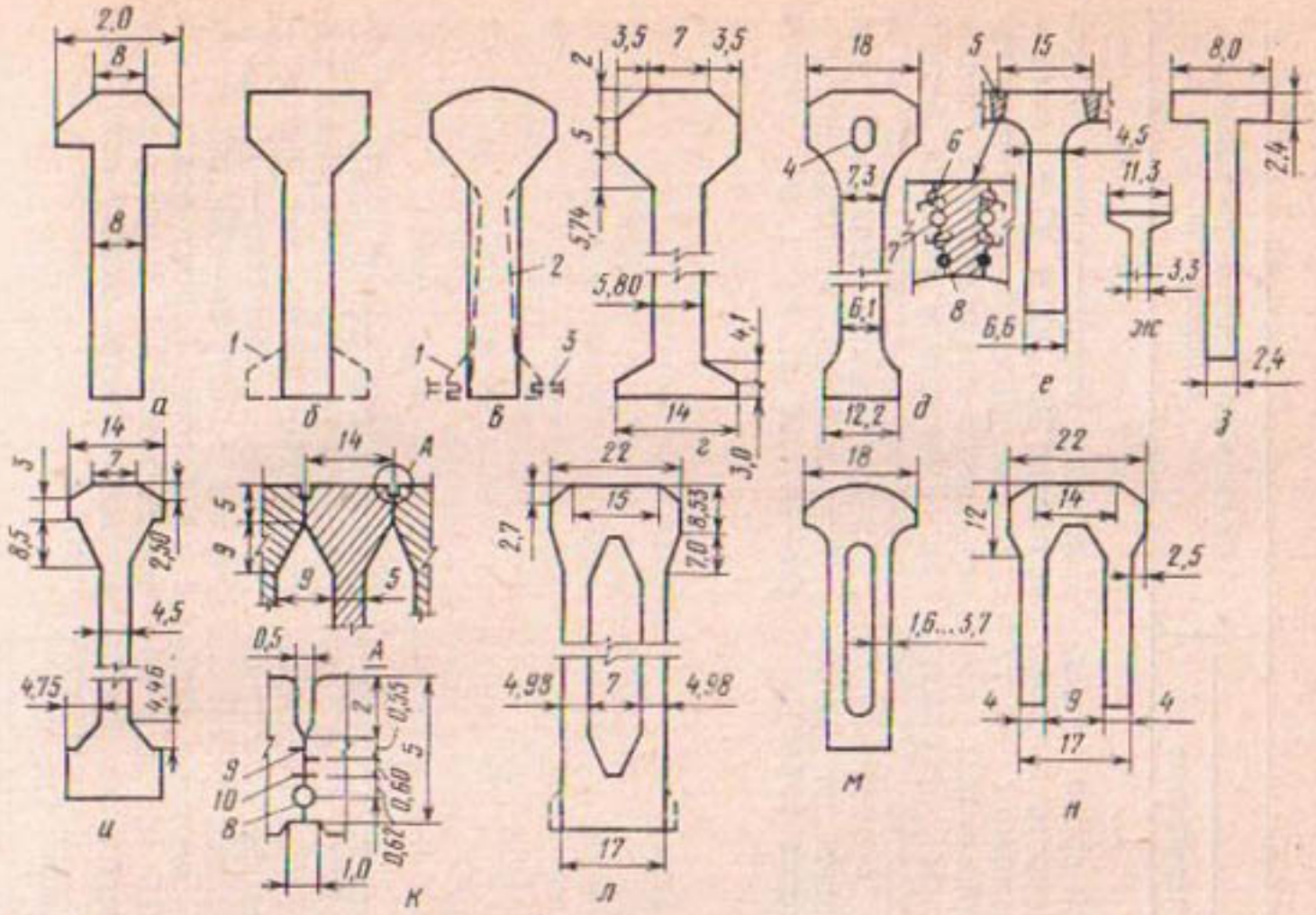


Рис. 4.23. Горизонтальные сечения массивно-контрфорсных плотин:

а...к — одиночные контрфорсы; *л...н* — сдвоенные; *е* — шотландский тип; *з* — плоская напорная грань; *к* — плоская с вырезом; *а, г, д, и, л, н* — полигональная; *в, м* — криволинейная напорная грань; *1* — приливы; *2* — вариант переменной толщины; *3* — вариант с теплоизолирующей стенкой; *4* — дренаж; *5* — бетонируемый шов; *6* — уплотнение; *7* — битумная шпонка с электродами для подогрева; *8* — дренаж; *9* — медный лист; *10* — резиновая лента. Размеры в м

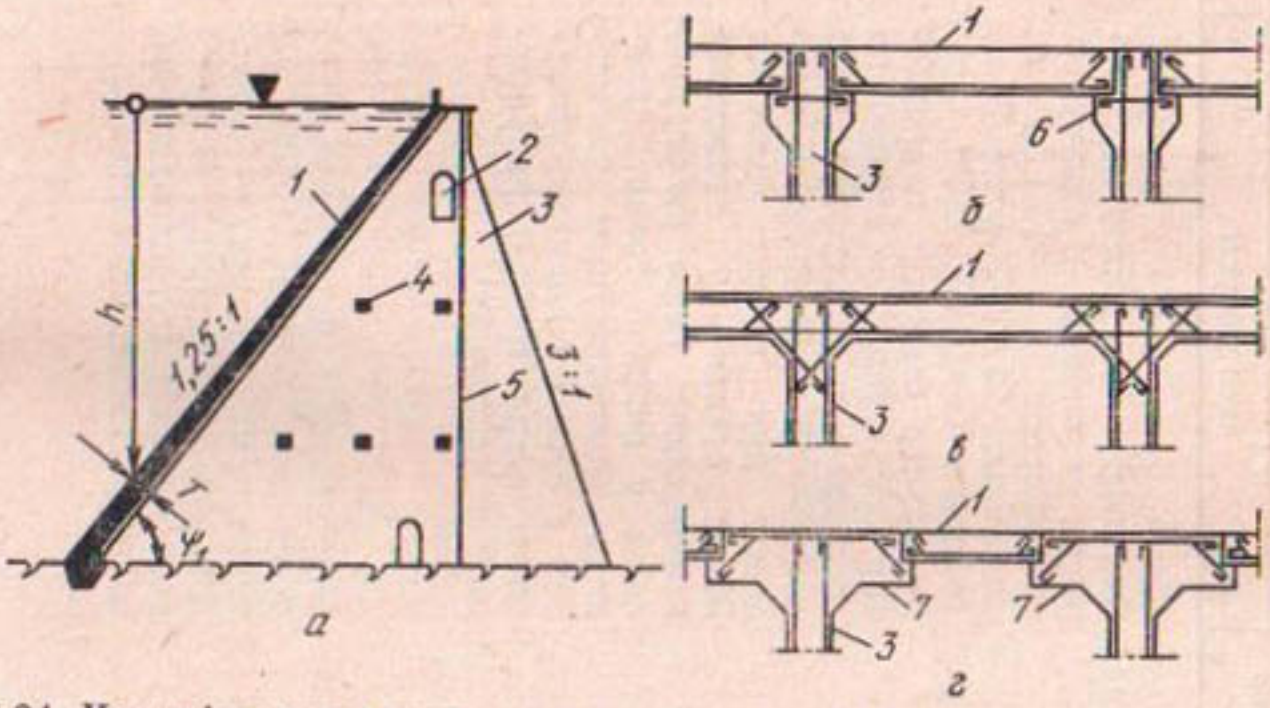


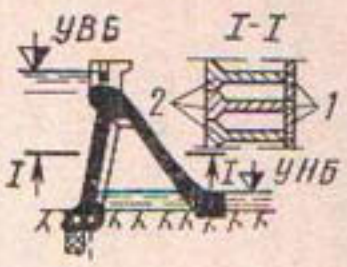
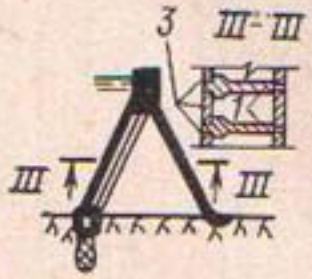
Рис. 4.24. Контрфорсная плотина с плоским перекрытием:

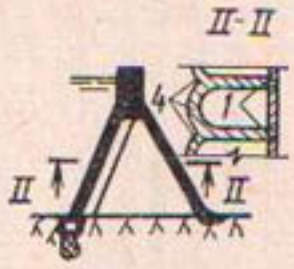
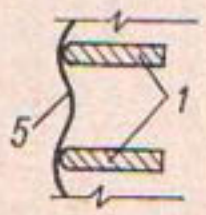
а — профиль плотины с теплоизолирующей стенкой; *б, г* — армирование разрезных плит; *в* — армирование неразрезных плит; *1* — плита; *2* — галерея; *3* — контрфорс; *4* — балки жесткости; *5* — теплоизолирующая стенка; *6* — оголовок; *7* — консоли

ройство требует обоснования. При отказе от устройства завесы контакт плотины с основанием в зоне верховой грани цементируют.

Гидроизоляцию напорной грани устраивают при надлежащем обосновании. В многоарочных плотинах ее часто покрывают торкретом, битумом или и тем и другим; иногда битум защищают бетонными плитами.

4.27. Типы контрфорсных плотин и их основные конструктивные элементы

Тип контрфорсной плотины	Конструктивные элементы		Область применения, достоинства и недостатки
	контрфорсы	напорные перекрытия	
Массивно-контрфорсная 	Одиночные и сдвоенные. Ширина оголовков одиночных контрфорсов $b=15...22$ м, сдвоенных 22...26, реже 34 м. Толщина $t_1=(0{,}25...0{,}5)t$, где t — размер секции в направлении оси плотины. Сопряжение оголовка с контрфорсом в плане — 45°. Элементы жесткости при высоте плотины 50 м: стенки у сдвоенных контрфорсов, реже ребра; приливы у низовой грани (являются теплозащитным элементом в суровом климате, уменьшают концентрацию напряжений в основании)	Форма напорной грани оголовков: плоская (проста в производстве, но возможны растягивающие напряжения); плоская с вырезом (улучшает напряженное состояние); полигональная и криволинейная (обжатие оголовка, но усложнение производства работ)	Наиболее распространены. Высота плотин 30...200 м. Основания — скальные. Достаточно равномерная эпюра напряжений в основании. Уменьшение расхода бетона до 20...40%, стоимости до 10...35% (бóльшие значения для глухих плотин). Расход арматуры — 6...10 кг на 1 м³ бетона
С плоскими перекрытиями 	Переменной или постоянной толщины $t_1=0{,}15...0{,}25\ t$ с элементами жесткости (балками, иногда стенками). В суровом климате с теплозащитными вертикальными стенками	Напорные перекрытия: разрезные (см. рис. 4.24, *б*, *г*), реже неразрезные (см. рис. 4.24, *в*) при наличии фундаментной плиты. Угол наклона $\psi_1\simeq 40...\simeq 60°$. Толщина плиты у гребня $t_{sup}\geqslant 0{,}2...0{,}5$ м, для облегчения производства работ $t_{sup}\geqslant 0{,}8...1$ м. Ширина консольного выступа $b<(0{,}1...0{,}5)t$. Процент армирования	Плотины небольшой высоты (не более 50 м). Просты в производстве работ. Экономия бетона — 25...45%, стоимости — 15...30%. Расход арматуры — 20...40 кг на 1 м³ бетона. Строят редко из-за тонкостенности конструкции и малых пролетов между контрфорсами

		$\mu \geqslant 0{,}1+0{,}0015\,R_b$ (R_b — расчетное сопротивление бетона 10^5 МПа)	
Многоарочные 	Контрфорсы сплошные и сквозные (в водосбросных плотинах). Пролеты $l=15...20$ м для железобетонных тонкостенных плотин; $l \geqslant 20...50$ м до 160 м для бетонных с толстыми контрфорсами. Часто $l \approx H/2$. Толщина $t_1=0{,}15...$ $...0{,}25\,t$. Угол ψ_1 от 55...65 до 40...45°, редко 60°	Перекрытие арочное кругового очертания, реже с круговой верховой и трехцентровой низовой гранью, утолщающееся к пятам. Угол $2\alpha=93...180°$. Толщина арок вверху $t_{arc}=$ $=0{,}3...1$ м для железобетонных и t_{arc} 1,7...2 м для бетонных плотин. Опирание арок жесткое, свободное или шарнирное. Применяют и купольные перекрытия (усложнение производства работ)	Плотины высотой 20...200 м на прочном скальном основании. Большие пролеты, сокращающие объем скальных работ; возведение в суровых климатических условиях и сейсмических районах. Экономия бетона — 30...60%, стоимости — 20...40%. Недостатки: большой расход арматуры 30...50 кг на 1 м³ бетона и более; сложность производства работ и пропуска больших паводковых расходов
Парусного типа 	Контрфорсы аналогичны контрфорсам плотин с плоскими перекрытиями и многоарочных	Перекрытие в виде оболочки из металла, стеклопластика, нейлона и т. п., работающей на растяжение. Толщина оболочки 5...150 мм	Плотины высотой 5...150 м. Экономия стоимости — 10...30%

Примечание. *1* — контрфорсы; *2* — массивные оголовки; *3* — плоское перекрытие; *4* — арочное перекрытие; *5* — парусное перекрытие.

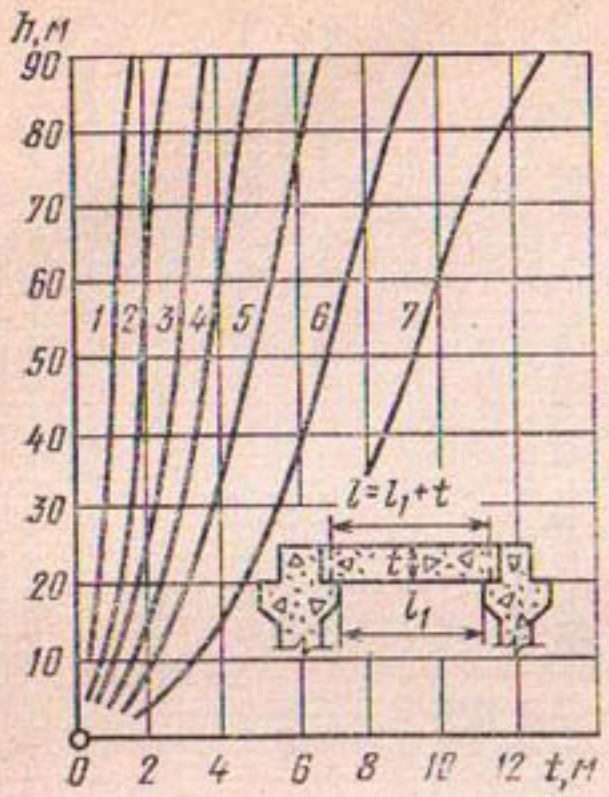


Рис. 4.25. Зависимость толщины разрезных плоских напорных перекрытий t от глубины ВБ h и длины перекрытия l:
1 — l=3 м; 2 — l=5; 3 — l=7; 4 — l=9; 5 — l=12; 6 — l=16; 7 — l=20 м; l_1 — длина перекрытия со стороны НБ

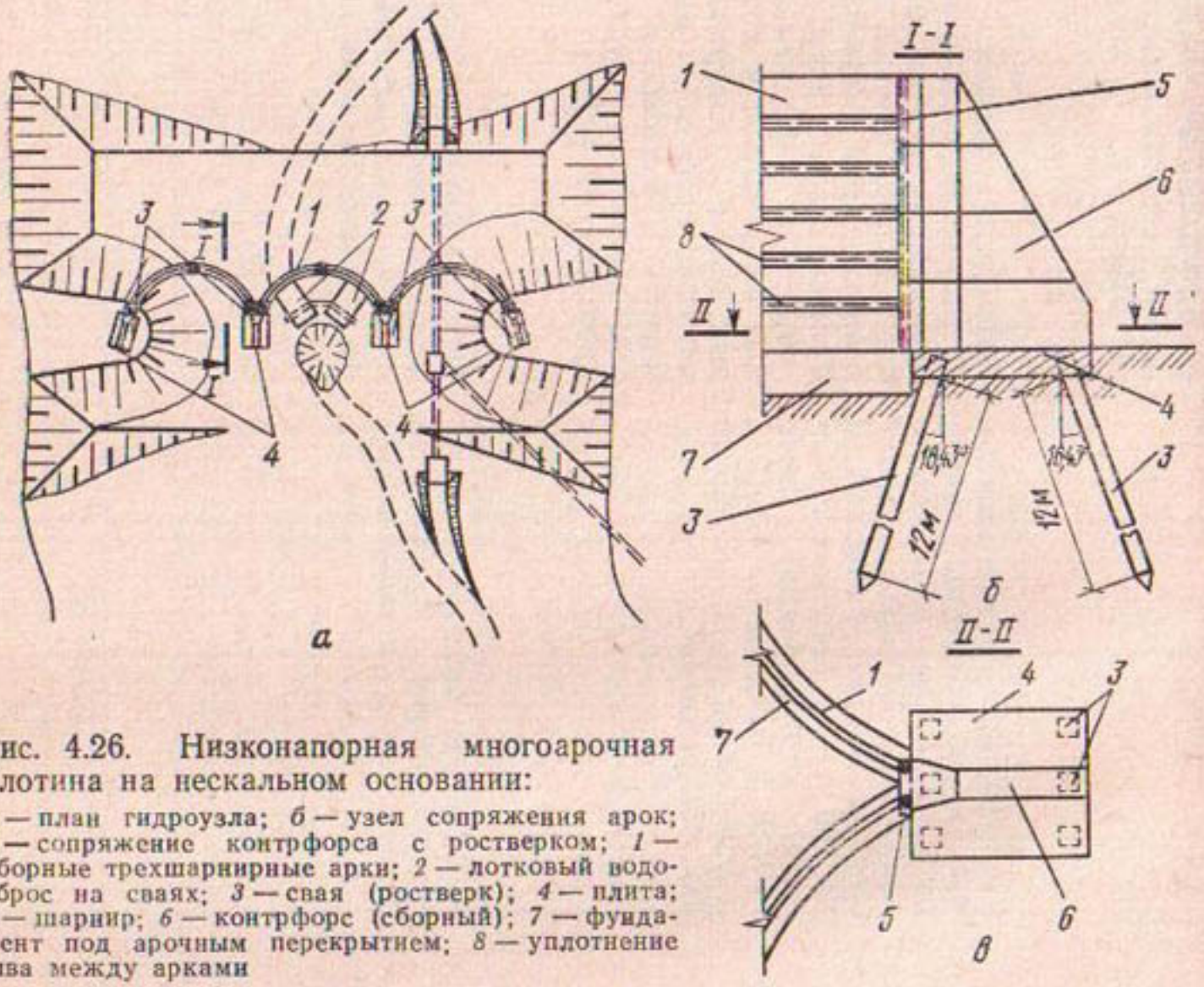


Рис. 4.26. Низконапорная многоарочная плотина на нескальном основании:
а — план гидроузла; *б* — узел сопряжения арок; *в* — сопряжение контрфорса с ростверком; *1* — сборные трехшарнирные арки; *2* — лотковый водосброс на сваях; *3* — свая (ростверк); *4* — плита; *5* — шарнир; *6* — контрфорс (сборный); *7* — фундамент под арочным перекрытием; *8* — уплотнение шва между арками

Швы конструктивные в массивно-контрфорсных плотинах устраивают между оголовками, по траекториям главных, наибольших нормальных или (реже) наименьших напряжений. Иногда выполняют активный шов с плоскими домкратами (рис. 4.27), создающий давление в направлении ВБ, что улучшает напряженное состояние в сопряжении верховой грани с основанием и повышает устойчивость плотины на сдвиг. После стабилизации смещений активный шов бетонируют.

Водопропускные сооружения: при малых пролетах устраивают водосливные плиты между контрфорсами толщиной t=0,8...1 м, реже 0,4...0,6 м;

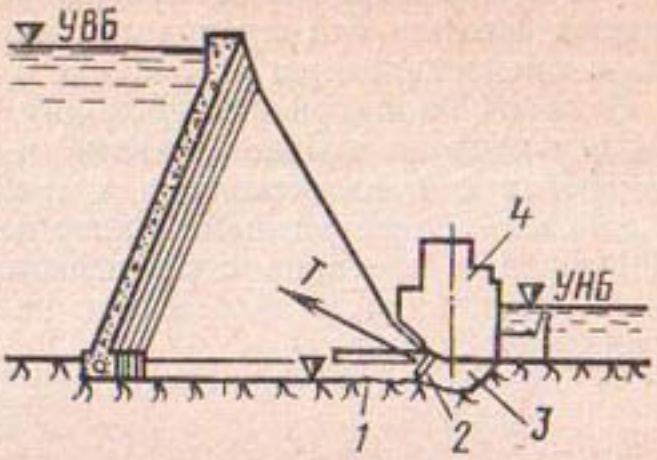


Рис. 4.27. Плотина с активным швом:

1 — основание; *2* — активный шов с плоским домкратом; *3* — упорный массив; *4* — ГЭС; *T* — усилие, развиваемое домкратом

при больших пролетах — поверхностные и глубинные водосбросы в контрфорсах или береговые (при больших расходах). В контрфорсах размещают и водовыпуски (водоспуски).

Для водосбросов, расположенных в пределах контрфорсов, обычно предусматривают носки-трамплины для распределения струи по площади русла в НБ. В многоарочных плотинах возможен перелив через арки, но при больших удельных расходах возникает опасность подмыва контрфорсов и требуется крепление.

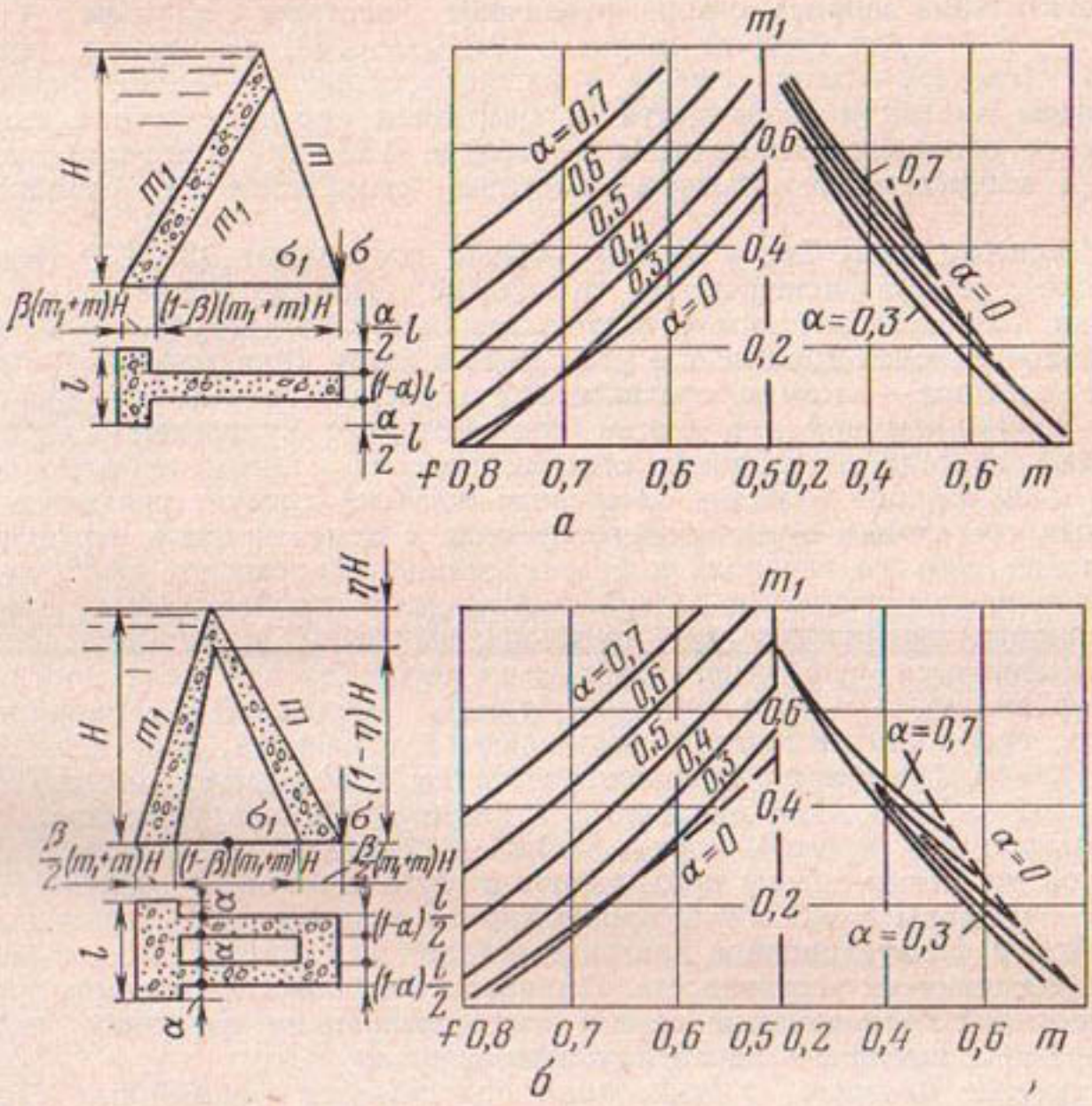


Рис. 4.28. Ориентировочные размеры массивно-контрфорсных плотин (по Р. Приску):

а — с одиночными контрфорсами (ρ_b=2,3 т/м³, β=0,125); *б* — со сдвоенными контрфорсами ρ_b то же, β=0,25, η=0,1, α=0,58...0,65); α — коэффициент пустотности контрфорса; H — высота плотины; l — длина напорного перекрытия контрфорса; m_1, m — наклон граней плотины со стороны ВБ и НБ; β — соотношение горизонтальных проекций верховой и низовой граней; η — соотношение вертикальной проекции гребня перекрытия и высоты плотины; f — коэффициент сдвига, $f=(\operatorname{tg}\varphi_1+c_1/\sigma_m)/\gamma_s$ [$\operatorname{tg}\varphi_1$, c_1 — внутреннее трение и сцепление грунта (см. табл. 1,10...1,12); σ_m — среднее напряжение по подошве плотины; γ_s — обобщенный коэффициент запаса, определяемый по формуле (2.11)]; ρ_b — плотность бетона

Особенности расчетов контрфорсных плотин. Размеры массивно-контрфорсных плотин при предварительных расчетах можно определить по графикам, представленным на рисунке 4.28.

Расчеты на прочность проводят согласно п. 2.4 в плоскости вдоль потока для отдельно стоящей секции в массивно-контрфорсных плотинах; для контрфорса с примыкающими к нему половинами пролетов с обеих сторон в плотинах с неразрезными напорными покрытиями; для отдельно стоящего контрфорса в плотинах с разрезными перекрытиями. Расчет напорных перекрытий на прочность выполняют на те же нагрузки и их сочетания, что и расчет контрфорсов.

4.3.5. АРОЧНЫЕ ПЛОТИНЫ

Классификация арочных плотин по **коэффициенту стройности** $\beta = b/h_{max}$ (b — ширина подошвы; h_{max} — наибольшая высота плотины): тонкие — $\beta < 0{,}2$; толстые — $\beta = 0{,}2...0{,}35$; арочно-гравитационные $\beta = 0{,}35...0{,}65$. **По относительной ширине створа** различают плотины в узких створах ($l_{ch}/h < 2$); в створах средней ширины ($2 \leqslant l_{ch}/h \leqslant 3$), в широких створах ($l_{ch}/h > 3$) (где l_{ch} — длина хорды арки по гребню; h — высота плотины). *Конструкции плотин* в зависимости от очертания арочной части и типа сопряжения с основанием приведены в таблице 4.28, а очертания арок в плане — в таблице 4.29. Арочные плотины сооружают в основном из бетона.

Центральные углы $2\alpha_0$ у гребня обычно составляют 130...90° (меньшие при сейсме); книзу уменьшаются до 70...60° (иногда даже до 35...13°). *Очертания консолей:* плотины с постоянным центральным углом — обычно с вертикальной низовой гранью и с утолщением внизу (или без него); цилиндрические плотины — часто с вертикальной верховой гранью при наклонной низовой (прямолинейной или слегка искривленной); купольные — имеют искривленные консоли. В широких створах консоли имеют постоянную или близкую к постоянной толщину. Очертание консолей следует увязывать с напряженным состоянием строительного периода и цементировать вертикальные строительные швы до перехода к бетонированию следующего яруса консоли во избежание возникновения растяжений от веса столбов, сейсма и т. п.

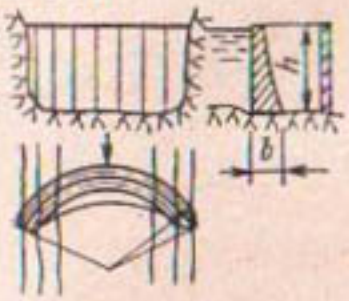
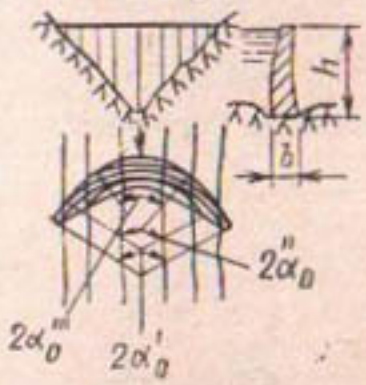
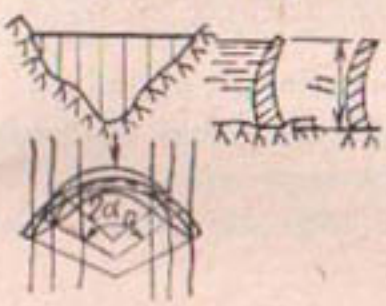
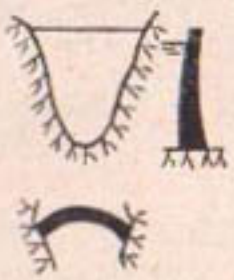
Противофильтрационные мероприятия аналогичны гравитационным плотинам. Особенности: при криволинейных консолях дренаж тела плотины не строго вертикален, а в виде отрезков прямой, соединенных с продольными галереями; особо тонкие плотины выполняют без дренажа; допускаемый градиент $I_{cr,m} = 40$. Противофильтрационные завесы в основании обычно вертикальные, иногда несколько наклонные в сторону ВБ, что уменьшает градиенты фильтрации в береговых примыканиях и повышает устойчивость последних; с этой же целью завесы продолжают в глубь берегов. В тонких арочных плотинах скважины могут быть пробурены со стороны НБ. Дренажные завесы снижают фильтрационное давление в береговых примыканиях и склонах в НБ, обеспечивая их устойчивость. В плотинах небольшой толщины дренажные и противофильтрационные завесы часто выполняют из одной галереи; иногда дренажи выводят в цементационные штольни.

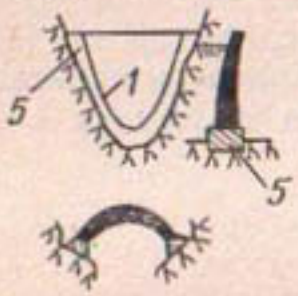
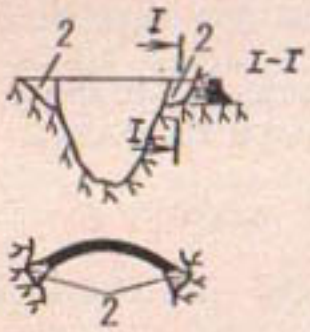
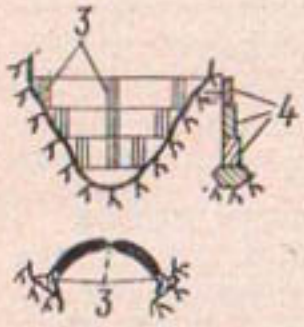
Сопряжение плотины с основанием определяется формой пят арок, от которых зависит устойчивость примыкания и объем врезок в скалу (табл. 4.30).

Устои плотин воспринимают давление от верхних арок и давление воды; для его уменьшения устраивают гравитационные открылки, между ними и устоем — дренаж. Для повышения устойчивости устои иногда анкеруют.

Армирование тела плотины выполняют у галерей, колодцев в устье несквозных швов, в верхней части плотины при сейсме, в «седле» при пересечении слабых зон основания (здесь же и дисперсное армирование). Расход арматуры — от 4...6 до 10...14 кг на 1 м³ бетона.

Учет особенностей геологии и топографии местности при проектировании рассмотрен в таблице 4.31.

Тип и схема конструкции	Область применения и особенности
По очертанию арочной части	
Цилиндрическая постоянной или переменной толщины 	Наиболее просты по очертанию и производству работ. Хорошо вписываются в ущелья U-образного профиля
С постоянным центральным углом $2\alpha_0$ арочной части (в действительности α_0 несколько уменьшается книзу) 	Несколько сложнее по очертанию. Широко применяют в ущельях треугольного профиля
Купольные, или арочные, двоякой кривизны 	Наиболее благоприятное распределение напряжений. Применимы при любых очертаниях ущелий; в широких створах консоли имеют постоянную толщину
По характеру сопряжения с основанием	
С защемленными пятами 	Один из наиболее распространенных способов сопряжения с основанием. Варианты пят (см. табл. 4.30)

Тип и схема конструкции	Область применения и особенности
С периметральным (контурным) швом 	Также широко распространенный способ сопряжения; уменьшает растягивающие напряжения у основания; можно получить симметричную ароч-ную часть плотины в несимметричном ущелье
С гравитационными устоями 	Сооружают при асимметрии ущелья
Из трехшарнирных поясов 	Единичные случаи применения в невысоких плотинах

Примечание. *1* — периметральный шов; *2* — гравитационные устои; *3* — шарниры; *4* — трехшарнирные пояса; *5* — седло.

4.29. Основные очертания арок

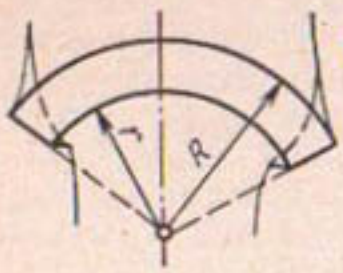
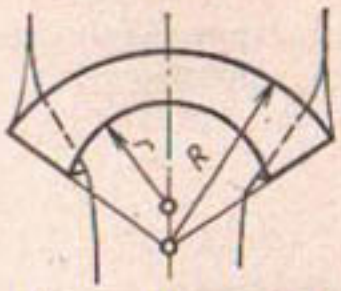
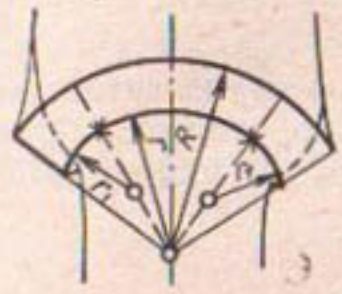
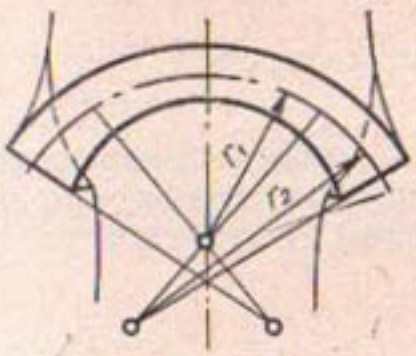
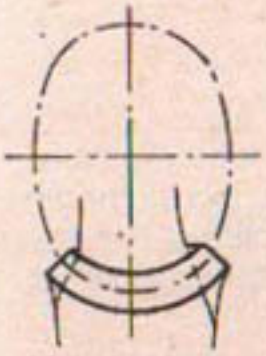
Схема	Характеристика
	Круговое очертание наиболее простое, но большие напряжения в пяте на низовой грани

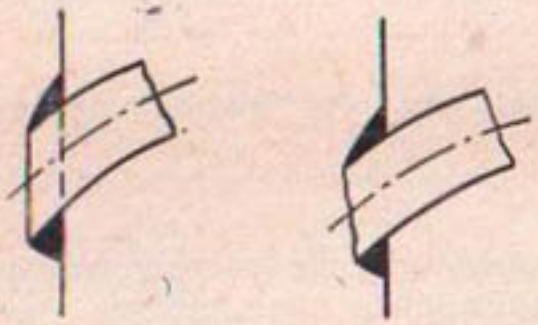
Схема	Характеристика
	Круговое очертание с утолщением к пятам: на слабых основаниях и высоких плотинах. Сечение утолщается к пяте: $t_п/t_c \approx 1{,}2\ldots1{,}5$, $t_п$ и t_c — толщина арки в пяте и ключе. Варианты: круговые неконцентрические (напорная и низовая грань описаны из разных центров)
	Круговые с трехцентровой низовой гранью
	Трехцентровое очертание. Более равномерное распределение напряжений, повышается устойчивость примыкания
	Очертания по кривым различной формы: эллиптической (при больших L_x/h; в купольных плотинах), гиперболической (рациональна при сейсме), по логарифмической спирали, по эластике Эйлера (напряжения на 30% меньше, чем при круговой форме), по параболе (в треугольных ущельях)

Примечание. R и r — радиусы арки соответственно наружный и внутренний; r_1, r_2 — радиусы дополнительного искривления арок.

Арочные плотины возводят и при достаточно сложной геологии основания. Для его укрепления проводят следующие мероприятия (рис. 4.29).

Вид укрепления	Технология выполнения
Цементация (см. рис. 4.29, *а*)	Выполняют на глубину 10...30 м до зоны допускаемых напряжений в скале. Модуль деформации повышается в 1,5...2 раза
«Лечение» крупных тектонических трещин и полостей (см. рис. 4.29, *б*)	Расчистка трещин и заполнение бетоном до требуемой глубины. Иногда устраивают «пробки», поверхностные «пломбы», «решетки»
Устройство стенок, свай и т. п. (см. рис. 4.29, *в*)	Стенки или сваи устраивают в слабой скале до прочной скалы в глубине массива
Вертикальные швы-разрезы (см. рис. 4.29, *г*)	Швы устраивают в верхней части плотины для передачи усилия на прочную скалу склона
Анкеровка сдвигоопасных скальных массивов (см. рис. 4.29, *а*, *д*)	Укрепление боковых примыканий анкером

4.30. Формы защемленных пят арочных плотин

Формы пят	Основная характеристика
	Радиальная пята. Применяют часто. Хорошие условия примыкания, но увеличивается объем врезки
	Прямолинейная и ступенчатая пяты. Объем врезок сокращается, но возникают концентрации напряжений
	Треугольная и полигональная пяты. Уменьшение объема врезок при достаточно хорошей статической работе
	Круговое, или ложкообразное, очертание. Повышение устойчивости, снижаются концентрации напряжений, но усложняется производство работ

Водосбросные сооружения, чаще всего используемые в арочных плотинах, приведены ниже.

Тип водосброса	Область применения и особенности конструкции
Поверхностные: водосливная грань	Обычно в арочно-гравитационных плотинах
на гребне плотины с падением струи вблизи ее	При расходе водослива $q<10$ м²/с (редко до 40 м²/с) — нерегулируемые; при $q>15$ м²/с — обязательно крепление дна
с сопряжением бьефов отбросом струи носками-трамплинами или лотками-быстротоками с трамплином	Первое — для массивных плотин; второе — для тонких или низких плотин
Глубинные совмещенные с плотиной	Сопряжение бьефов отбросом струи; может потребовать крепление НБ
Береговые открытые и туннельные	Распространенное компоновочное решение

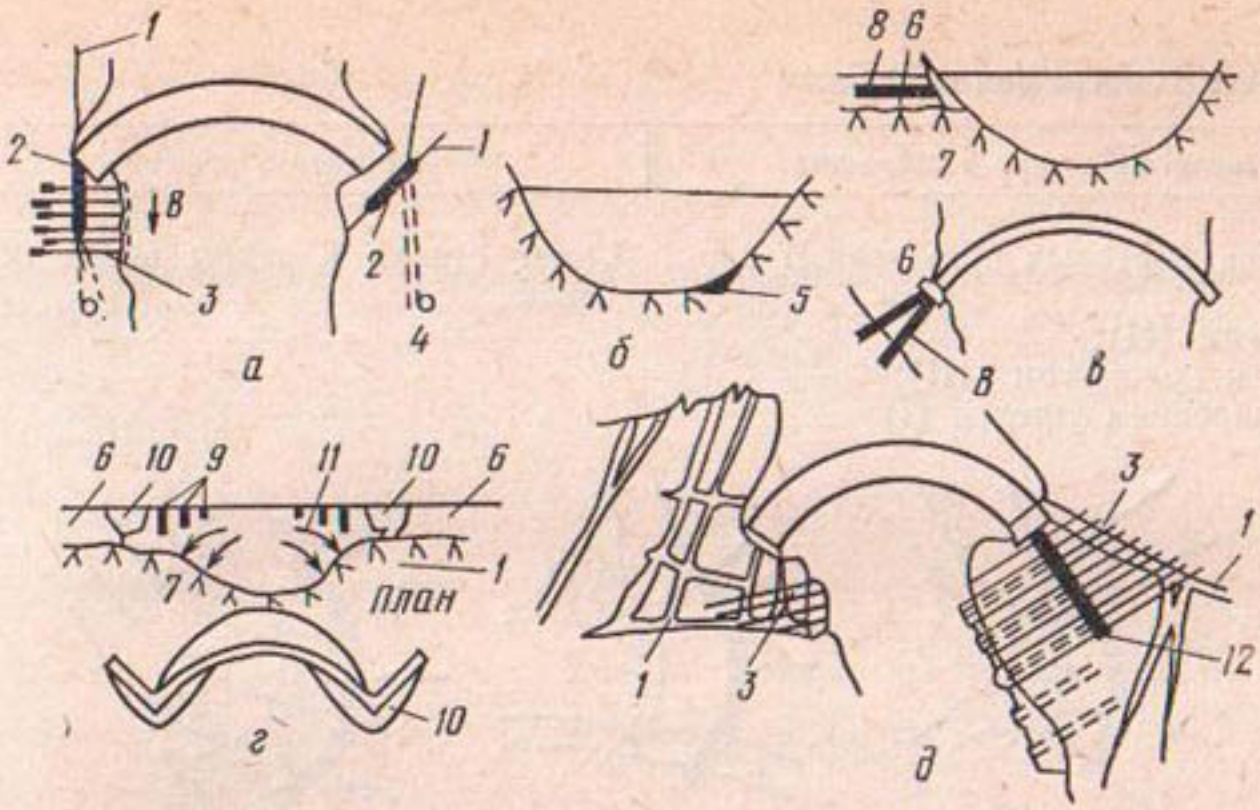


Рис. 4.29. Укрепительные мероприятия в основании арочных плотин:

а — лечение крупных трещин; *б* — устройство дамбы; *в* — устройство сваи-стенки; *г* — шов-разрез; *д* — анкеровка бокового примыкания; *1* — трещина; *2* — заделанная трещина; *3* — анкеры; *4* — скважины цементации; *5* — бетонная пломба; *6, 7* — скала слабая и прочная; *8* — штольни, заполненные бетоном; *9* — швы-разрезы; *10* — гравитационные устои-открылки; *11* — направление усилий; *12* — стенка, передающая усилия на прочную скалу

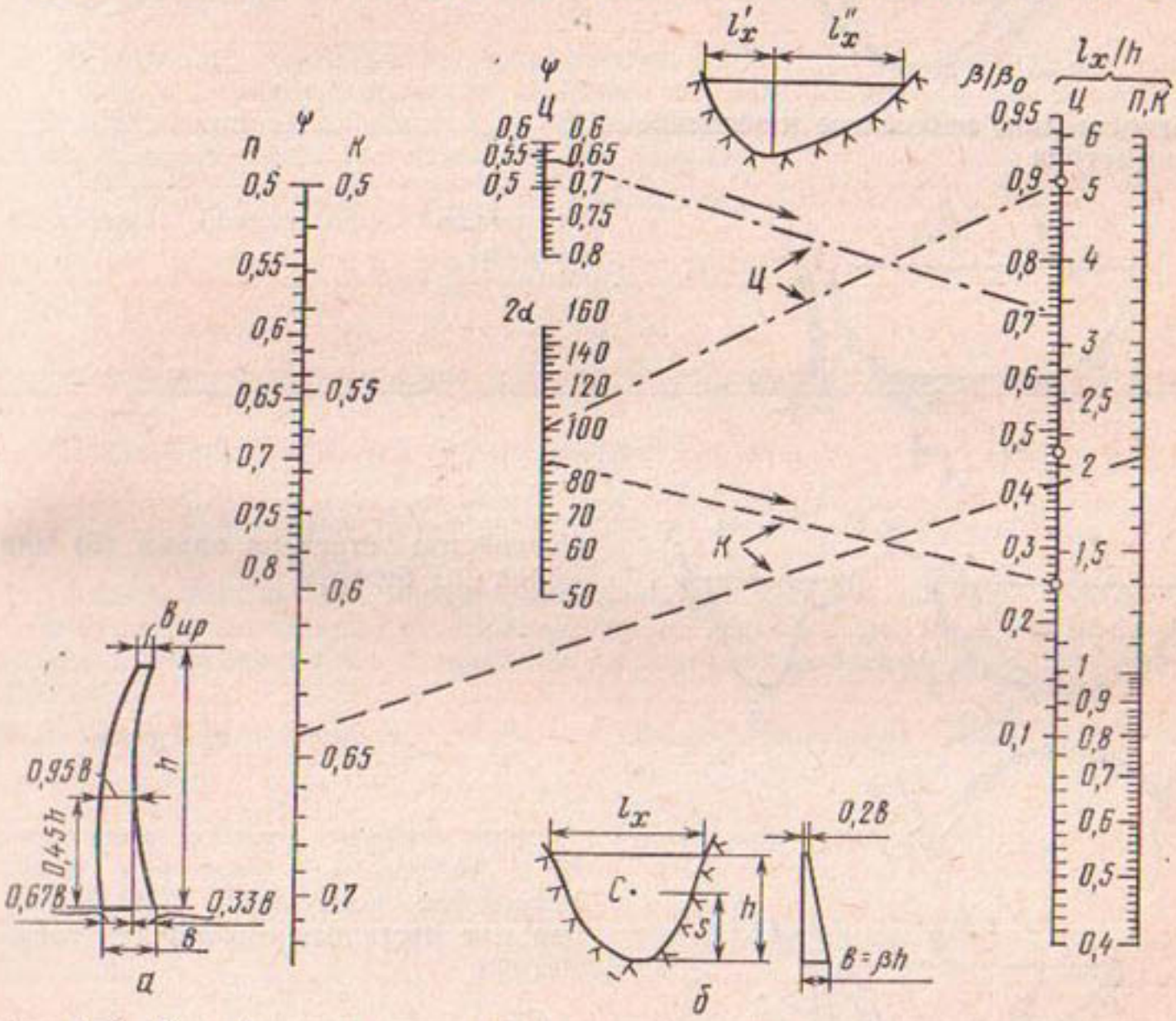


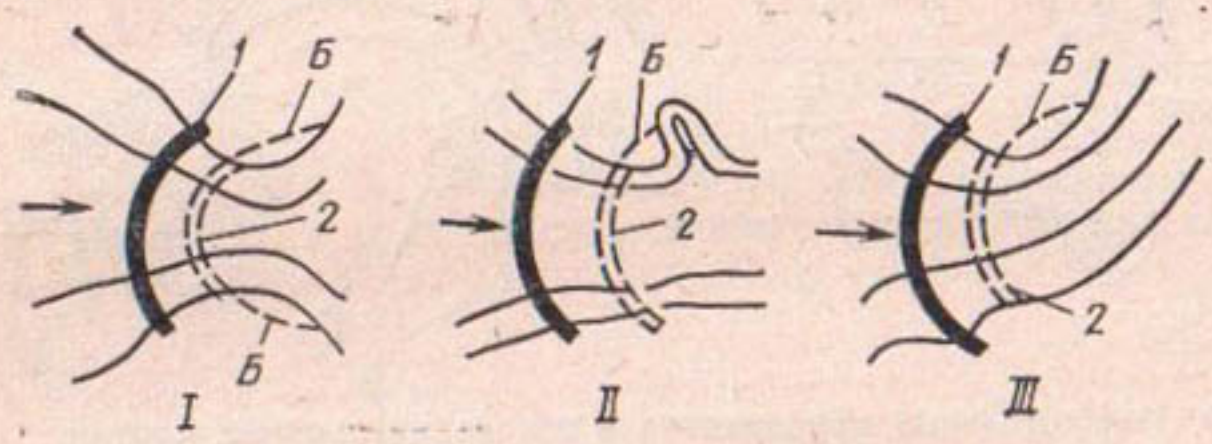
Рис. 4.30. К выбору поперечного сечения арочной плотины:

а — по формулам Бюро мелиорации США; *б* — определение $\beta=b/h$ по Р. Шредеру; Ц, П и К — плотины цилиндрические, с постоянным центральным углом и купольные; точка *С* — центр тяжести поперечного сечения ущелья, принятого до отметки гребня плотины; $\alpha_l=l_x/h$; $\psi=S/h$; 2α — центральный угол у гребня; $\beta_0=0{,}65$ (значение при $\alpha=0$ — гравитационная плотина)

4.31. Учет топографии местности

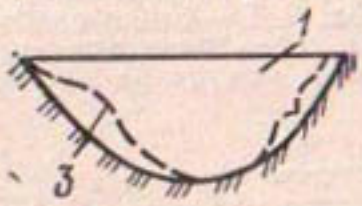
Неблагоприятная топография	Проектное решение

Подрезка бортовых примыканий плотины:
оврагом (II);
резким поворотом (III);
расширением ущелья (I)



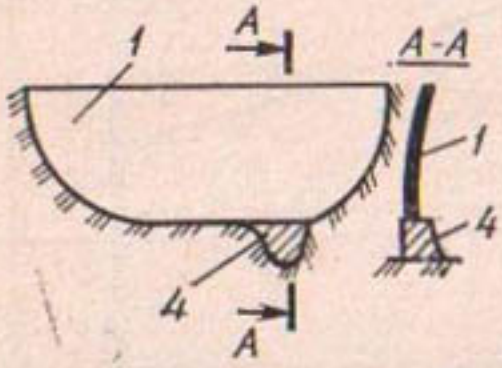
Сдвиг створа плотины вверх по течению;

Несимметричность ущелья

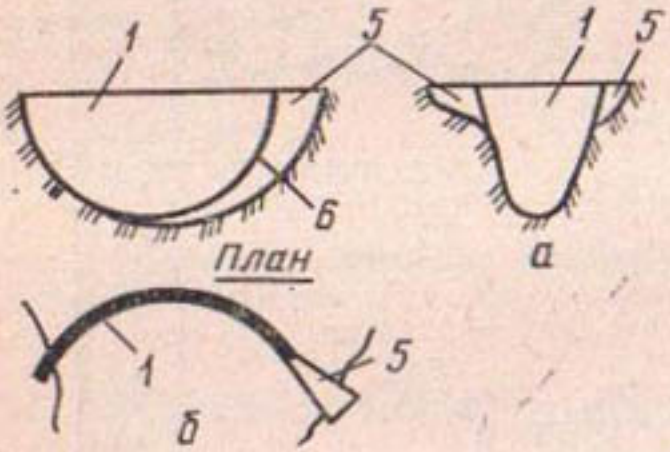


относительно небольшое нарушение симметрии

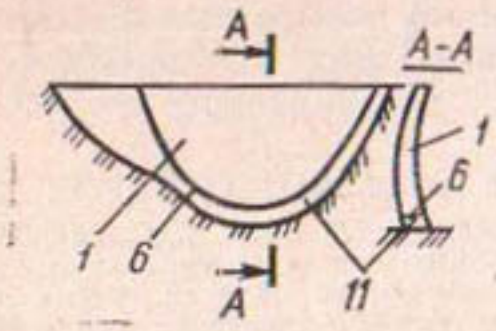
Выемки скалы



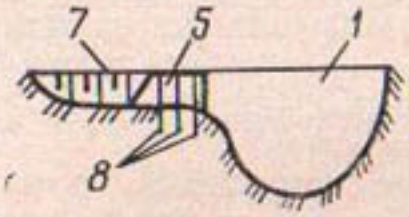
Устройство утолщенной (жесткой) пробки



Устройство устоев на одном (*б*) или обоих (*а*) берегах



Устройство контурного шва — полная или частичная ликвидация асимметрии

Неблагоприятная топография	Проектное решение
резкое расширение ущелья в верхней части 	Устройство гравитационного устойчивого на сдвиг устоя с грунтовой вставкой или анкером; устройство швов надрезов
Местные повышения в русле	Двухарочная плотина. Необходим контроль за напряжениями в большой арке в зависимости от размеров арок и деформированности места опирания

Примечание. *1* — плотина; *2* — вариант створа; *3* — поверхность скалы; *4* — утолщенная (жесткая) пробка; *5* — устои; *6* — контурный шов; *7* — грунтовая вставка; *8* — анкер; *9* — местное повышение; *10* — контрфорс; *11* — седло; Б — поверхность сдвига у берегового уровня.

Особенности расчетов арочных плотин. Ориентировочный профиль арочной плотины высотой более 30 м можно принять по методу Бюро мелиорации США; толщина плотины $b_{ир}$ — по гребню; b — по подошве и b_1 — на высоте $0{,}45\,h$ (рис. 4.30, а) соответственно равны

$$b_{ир} = 0{,}01\,(h + 1{,}2l_1);$$

$$b = \sqrt[3]{0{,}0012hl_1l_2\,(h/122)^{h/122}},$$

$$b_1 = 0{,}95b,$$

где l_1 — длина хорды верхней арки; l_2 — длина хорды арки на высоте $0{,}15\,h$ от подошвы.

Примерный объем (м³) бетона арочной плотины

$$V = 0{,}000177h^2l_2\frac{(h + 0{,}8l_1)^2}{l_1 - l_2} + 0{,}0108hl_1\,(h + 1{,}1l_1).$$

Форму ущелья при определении размеров арочной плотины учитывают с помощью номограммы Р. Шредера (рис. 4.30, *б*). При этом коэффициент формы ψ определяют по следующим формулам в зависимости от очертания ущелья:

Параболическое U-образное	$\Psi = (n+1)/(2n+1)$, где $n=2$ для квадратичной параболы, $n=3$ для кубической и т. д.
U-образное в виде сегмента радиусом R, площадью A_0, хордой l_x и высотой h	$\Psi = [R - l_x^3/(12A_0)]/h$
Трапецеидальное с шириной по дну l_0	$\Psi = (2+\xi_0)/(3+3\xi_0)$, где $\xi_0 = l_0/l_x$

Относительную толщину плотины $\beta = b/h$ при асимметрии профиля определяют следующим образом: по рисунку 4.30, *б* находят $\alpha' = 2l_x'/h$ и $\alpha'' = 2l_x''/h$ и соответствующие им ψ' и ψ'' для симметричных долин с шириной на гребне

$2l'_x$ и $2l''_x$; β при α' и ψ' и при α'' и ψ''. Принимают максимальное или среднее из полученных значений β.

Примеры: для типа К (пунктир) с $l_x/h=2{,}09$; $\psi=0{,}642$; $2\alpha=87°$; $\beta/\beta_0=0{,}245$; $\beta=0{,}65\cdot0{,}245=0{,}159$; для типа Ц (штрихпунктир): $l_x/h=3{,}3$; $\psi=0{,}652$; $2\alpha=100°$; $\beta/\beta_0=0{,}9$; $\beta=0{,}65\cdot0{,}9=0{,}585$.

Параметры конструктивных элементов плотины уточняют расчетом плотин на прочность и устойчивость (см. п. 2.3 и 2.4). Расчет напряженно-деформированного состояния проводят с учетом последовательности возведения плотины, омоноличивания швов и наполнения водохранилищ, применяя метод арок-консолей (метод пробных нагрузок) при сращивании перемещений арок и консолей не менее трех видов; метод конечных элементов в трехмерных условиях; метод суперэлементов и др.

Расчеты плотин III и IV классов, а также предварительные расчеты плотин всех классов выполняют упрощенными методами: метод арки — центральной консоли, метод пробных нагрузок, по теории тонких оболочек и др.

4.4. ДЕРЕВЯННЫЕ ПЛОТИНЫ

Деревянные плотины (табл. 4.32) распространены в районах, богатых лесом. Отечественное строительство таких плотин имеет многовековой опыт с оригинальными конструкциями деревянных гидротехнических сооружений, среди которых знаменитая русская ряжевая плотина, судоходные шлюзы и др. Общая схема деревянной плотины показана на рисунке 4.31, а конструктивные варианты — на рисунке 4.32.

Деревянные плотины подразделяют на постоянные и временные, относят их в основном к III и IV классам. Основные достоинства и недостатки деревянных плотин приведены в таблице 4.1.

Выбор типа плотины определяется следующими факторами: предельным напором на плотину, характером естественного основания, наличием лесных материалов и транспортных средств, сроком службы плотины. Предельный напор с учетом характера основания назначают исходя из статической прочности и устойчивости элементов деревянной плотины при наибольшем размере сечения бревна $d=0{,}31$ м.

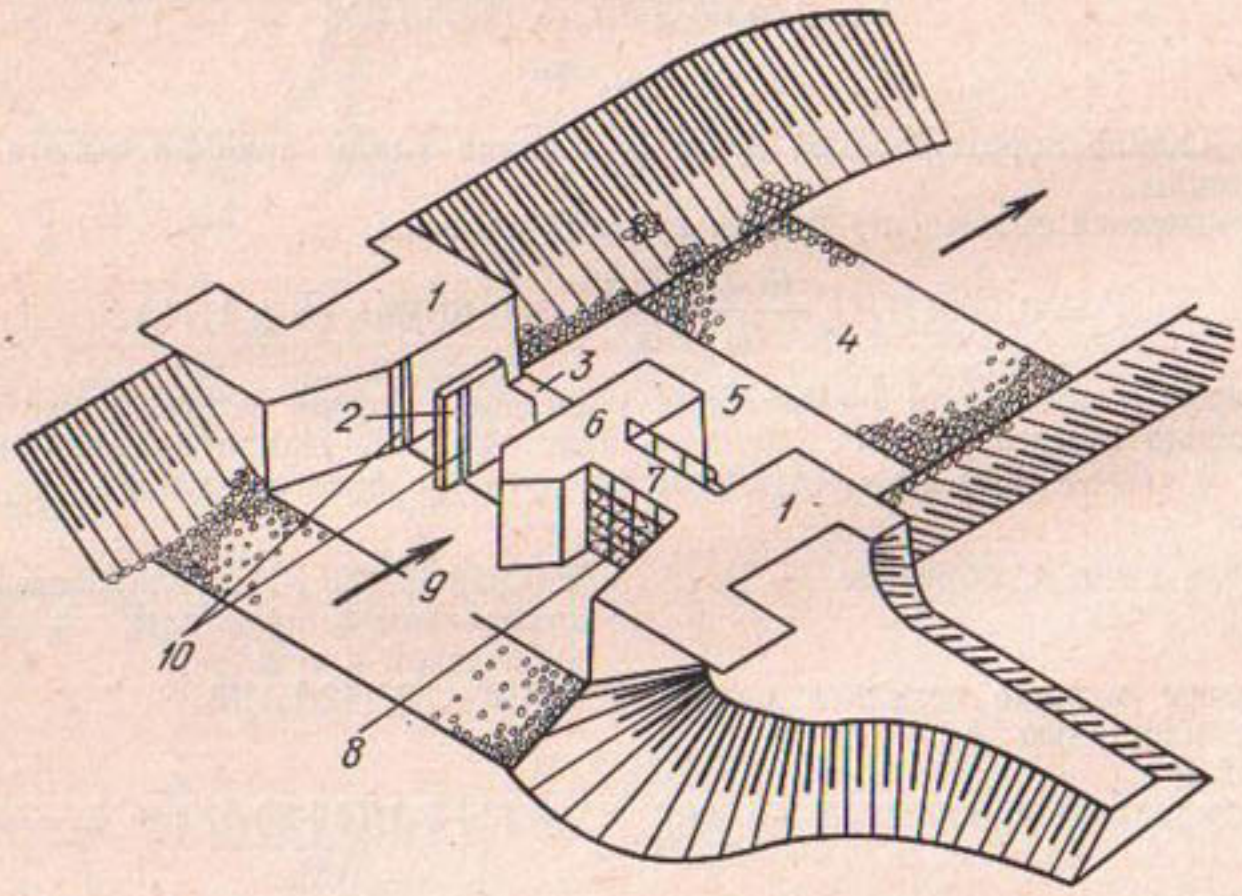


Рис. 4.31. Общий вид деревянной водосливной плотины:
1 — устой; *2* — контрфорс; *3* — водобой; *4* — рисберма; *5* — слив; *6* — бык; *7* — мост; *8* — стойки и щиты; *9* — понур; *10* — пазы для щитов (щиты сняты)

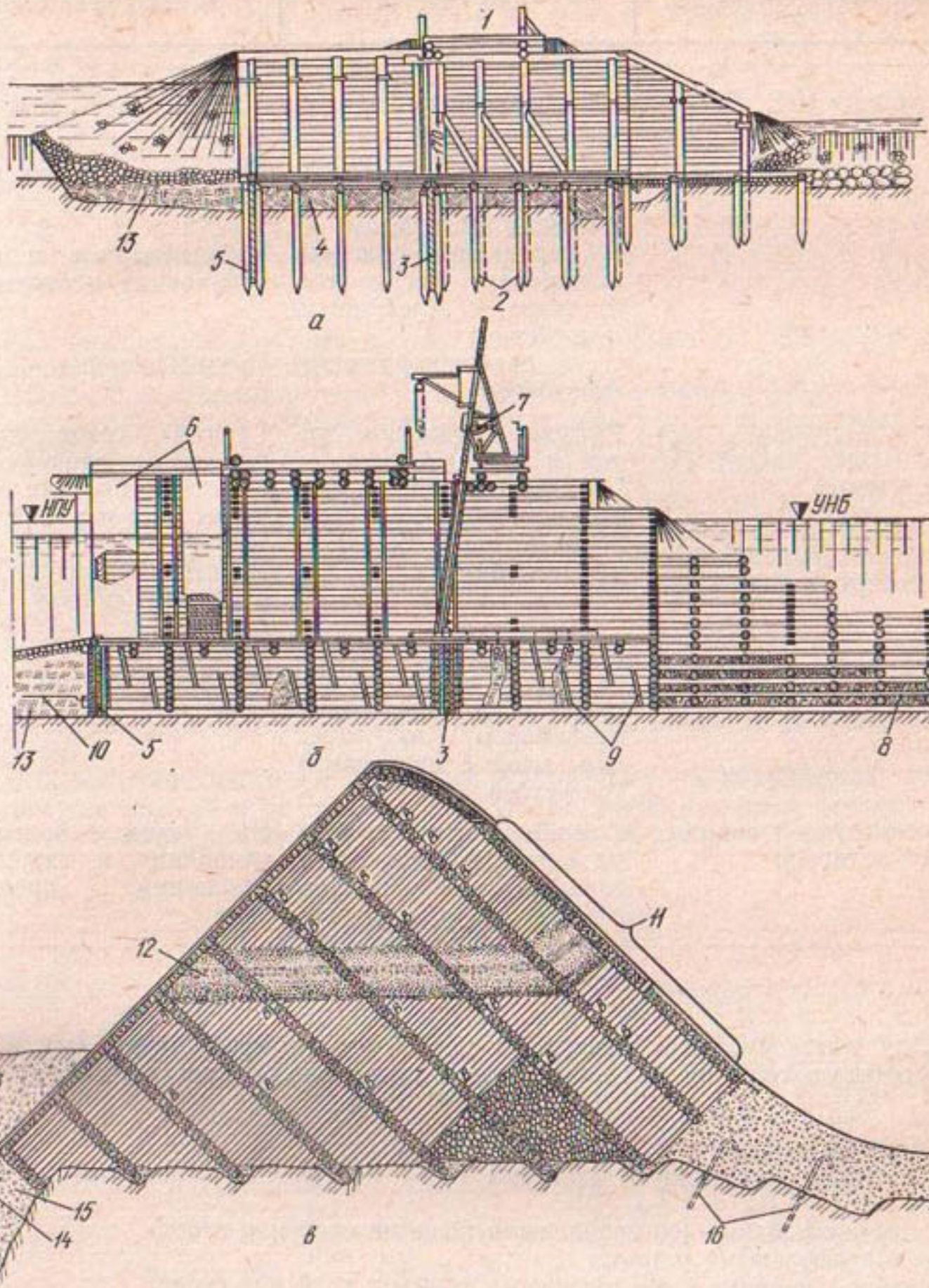


Рис. 4.32. Конструкции деревянных плотин:

а — стоечно-обшивной на свайном флютбете; *б* — ряжевой на флютбете из вертикальных ряжей; *в* — плотина из наклонных ряжей; *1* — мост; *2* — свая; *3, 5* — шпунтовые стенки понурная и королевая; *4* — загрузка из песчано-гравийной смеси; *6* — обшивка из листовой стали; *7* — подъемник; *8* — сквозные ряжи; *9* — шпонки; *10* — битумный мат; *11* — зона тщательной подгонки венцов; *12* — слоистая песчано-торфяная диафрагма; *13* — грунтовый понур; *14* — прокладка; *15* — бетонный зуб; *16* — анкер; *В* — венцы

4.32. Классификация деревянных плотин

Признак классификации	Вид плотины	Условия применения
По напору H	Низконапорные;	Напоры до 5...6 м
	средненапорные	Напоры: 6 м$<H<$18 м
По конструкции флютбетов	Со свайным флютбетом; со смешанным свайно-ряжевым флютбетом	Низконапорные плотины
	С вертикально-ряжевым флютбетом; с контрфорсным (ребристым флютбетом)	Низконапорные и средненапорные плотины
	С наклонно-ряжевым флютбетом	Средненапорные плотины
По конструкции надфлютбетных частей (устоев, быков)	Ряжевые (ряжевые устои и быки)	Грунты основания не допускают забивку свай
	Свайные (свайно- или стоечно-обшивные береговые устои и быки)	Грунты основания допускают забивку свай, $H\leqslant$ $\leqslant$4 м
	Свайно-ряжевые	Грунты основания допускают забивку свай, $H<$6,5 м
	Контрфорсные (вертикальные опоры — береговые и промежуточные контрфорсы, из стоек или свай с подкосами) без устоев	Грунты основания допускают забивку свай, $H=3$ м
По конструкции опорных частей затворов	С постоянными стойками или фермами, разборными съемными щитовыми или вращающимися стойками или фермами	На реках с большими паводками и тяжелыми условиями пропуска льда

Для низконапорных деревянных плотин предельные напоры (м) в зависимости от особенностей конструкции имеют следующие значения:

для свайных плотин	
с передачей давления от щитовых стоек на королевый шпунтовый ряд	2
свайно-обшивные (со свободными концами свай или стоек)	2,5
с контрфорсными устоями	3
свайно-обшивные с заякоренными концами свай или стоек	4
для свайно-ряжевых плотин	До 6,5
для ряжевых плотин	
при устройстве анкерной связи ряжевого флютбета с основанием против всплытия	До 6
при отсутствии анкерных связей	До 5

Ряжевые плотины с повышенным напором делают из ряжей вертикальных или наклонных. В глухих вертикально-ряжевых плотинах с каменной загрузкой ряжей предельная высота в зависимости от диаметра бревен и размера клеток составляет 10...24 м (табл. 4.33). Предельная высота водо-

4.33. Предельная высота ряжевых плотин, м

Размер клеток ряжей, м	Высота вертикально-ряжевых плотин при диаметре бревен, м			Высота наклонно-ряжевых плотин при допускаемом напряжении на смятие венцов, Н/см²	
	0,25	0,30	0,35	120 (III класс)	150 (IV класс)
1,5	16,6	20,2	23,7	17,7	21,8
2,0	13,2	15,6	18,0	13,0	15,7
2,5	11,2	13,0	15,0	10,2	12,0
3,0	10,2	11,8	13,4	8,9	10,7

сливных вертикально-ряжевых плотин зависит от толщины переливающегося слоя воды и колеблется от 10 до 18 м.

Наклонно-ряжевые плотины в зависимости от размеров клеток и допускаемого напряжения на смятие венцов имеют высоту 9...22 м (см. табл. 4.33).

Основной состав расчета деревянных плотин приведен в таблице 4.34.

Строительство деревянных плотин в районах вечной мерзлоты и на пучинистых грунтах, как и других гидротехнических сооружений, должно вестись с соблюдением одного из условий: сохранение основания в мерзлом состоянии в течение всего периода эксплуатации или обеспечение талого состояния основания путем его предварительного или постепенного оттаивания в период эксплуатации.

Применительно к деревянным плотинам более реально второе условие. Для его обеспечения рекомендуется предусматривать комплекс мероприятий:

замену пучинистого грунта в флютбете сооружения и под ним на непучинистый грунт, уплотнение грунтов, пригрузку сооружения, применение теплоизоляции;

использование плотин с ряжевыми флютбетами на подрусловом талике мощностью более 5 м, а также в тех случаях, когда в период эксплуатации под сооружением развивается талая зона. Толщину ряжевых флютбетов на-

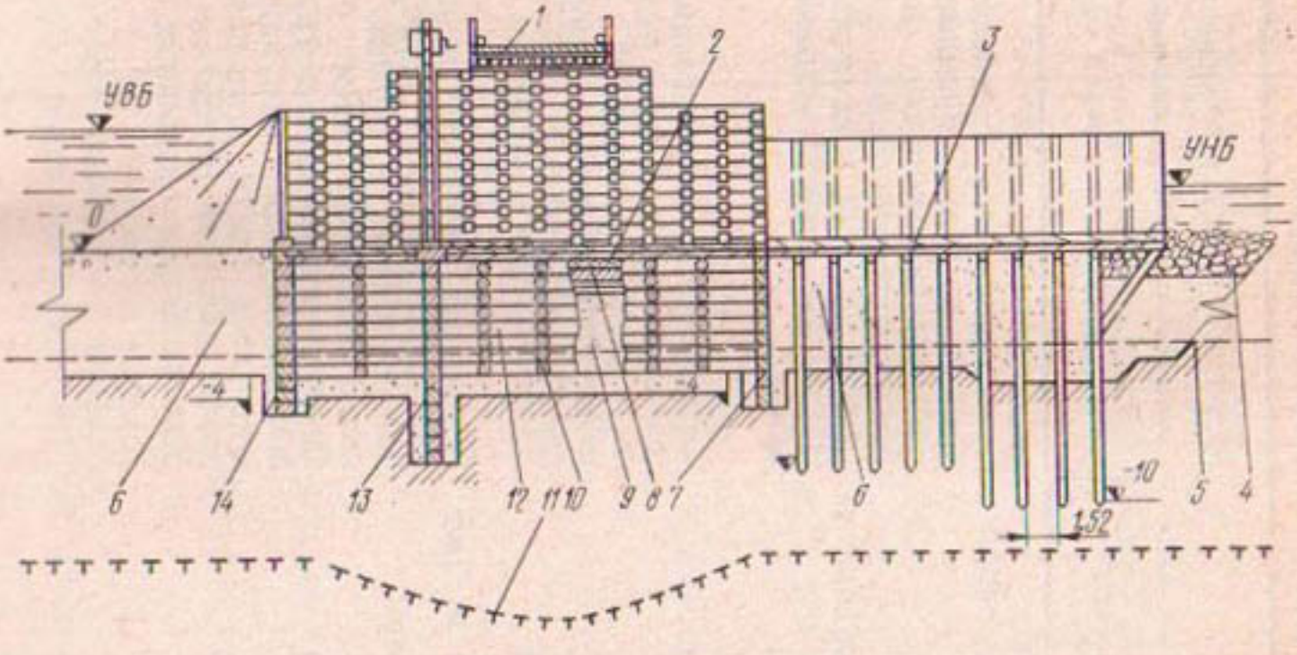


Рис. 4.33. Плотина для районов вечной мерзлоты и пучинистых грунтов:

1 — служебный мостик; *2* — гидроизоляция; *3* — стоечно-обшивная консоль на свайном основании; *4* — крепление воронки размыва каменной наброской; *5* — граница сезонного промерзания; *6* — подсыпка из супесчаного грунта; *7, 13, 14* — противофильтрационные стенки водобойная, королевая и понура; *8* — теплоизоляционное покрытие; *9* — замена пучинистого грунта; *10* — заглубление ряжевого флютбета ниже зоны промерзания; *11* — граница вечной мерзлоты; *12* — ряжевый флютбет

4.34. Основные расчеты деревянных плотин

Расчет прочности и устойчивости		Гидравлический расчет	Фильтрационный расчет
элементы плотины	схема расчета по методам сопротивления материалов		
Промежуточная опорная стойка: без подкоса с подкосом	Сечение с учетом ослабления его пазами подбирают по изгибающему моменту Балки на двух опорах Балки на трех опорах	Ширину отверстий плотины с учетом бокового сжатия потока устоями, быками и опорными стойками определяют по схеме водослива с широким порогом со свободным или подтопленным истечением. Сопряжение потока с НБ при принятой ширине отверстия рассчитывают как для всех подпорных сооружений: глубина в сжатом сечении — сопряженная с ней глубина — сравнение с бытовой глубиной НБ — назначение мероприятий по гашению энергии при необходимости (водобойный колодец и др.). Прогноз размыва НБ за рисбермой	Проводят методом удлиненной контурной линии. Цель: проверка конструкции и размеров флютбета по контролирующему градиенту фильтрационного потока; определение выходного градиента фильтрационного потока; сравнение обоих градиентов с допустимыми для грунтов основания
Нижний продольный упорный брус	Смятие по торцу и скалывание вдоль волокон. Нагрузка — давление стойки, равное опорной реакции		
Контрфорсная стойка	Система стоек с подкосами на действие горизонтальных сил. Общее усилие от гидростатического давления воды в пролете (расстояние между контрфорсами) делится на число стоек вдоль контрфорса		
Ряжевые устои и быки	Проверяют прочность ряжа (одной клетки шириной, равной длине устоя) на изгиб, а врубок поперечных стен в лицевые — на смятие и скалывание. Устой проверяют на устойчивость при сдвиге и напряжение в грунте под венцами ряжа. Действующие силы: нагрузки от собственного веса, веса моста, затворов, механизмов, транспорта; давление грунта на устои со стороны берега, воды при опущенных затворах, льда		

Свая-стойки боковых устоев:	Прочность на изгиб под действием давления грунта по ширине полосы, равной расстоянию между стойками
с распорками вверху	Балки на двух опорах
со свободным верхним концом	Балки, заделанной нижним концом
Свая с анкерами:	Система свая (у стенки) — анкер — свая в грунте
без подкоса	Рассматривают балку на двух опорах с консолью. Определяют давление, передаваемое на анкерную схватку
с подкосом	Анкерная свая работает на растяжение, подкос — на сжатие
Обшивка боковых стен	Толщину доски (пластины) определяют как для балки на двух опорах с пролетом, равным расстоянию между осями боковых (стенных) свай, работающей на изгиб от равномерно распределенной нагрузки от давления грунта
Свая флютбета	Обычная свая, забитая в грунт
Полы из досок (пластин)	Две опорные балки, работающие на изгиб по максимальному изгибающему моменту в расчетном пролете. При двойных полах за момент сопротивления приближенно принимают сумму моментов сопротивления отдельных досок или досок и пластин

значают не менее величины сезонного промерзания. Устройство свайного флютбета возможно при обеспечении заанкерования свай в вечной мерзлоте;

специальную (химическую) обработку грунтов путем солонцевания и пропиткой вяжущими материалами с целью предотвращения смерзания грунта со стенками устоев, быков, полов и отхода грунта от стенок.

При проектировании плотин необходимо выполнять расчеты на действие касательных и нормальных сил морозного пучения с учетом специфики эксплуатации сооружений, которая вызывает изменение состава грунтов, влажности и промерзания основания.

Одна из рациональных конструкций применительно к району вечной мерзлоты и пучинистых грунтов представлена на рисунке 4.33.

4.5. ТКАНЕВЫЕ ПЛОТИНЫ

Плотины из тканевых материалов, как показал отечественный и зарубежный опыт, можно применять при напорах до 5 м и высоте сооружения до 6...8 м.

По конструктивным признакам и принципу работы (рис. 4.34, 4.35) тканевые плотины классифицируют следующим образом.

Признак классификации	Тип плотины
По сроку службы	Постоянные и временные
По принципу работы	Замкнутые или наполняемые; открытые — мембранные или парусные; комбинированные
По конструктивным особенностям:	Замкнутые (см. рис. 4.34):
по типу заполнителя	Водонаполняемые, воздухонаполняемые, водовоздухонаполняемые
по системе заполнения	С самотечной, принудительной, комбинированной
по системе управления	С ручной (местной, дистанционной и автоматической)
по типу основания под оболочкой	С флютбетом и без флютбета
по числу оболочек в сечении плотины	Однооболочные и многооболочные
по форме оболочек	Цилиндрические, подушечные, сложной формы
	Открытые (см. рис. 4.35):
по числу пролетов	Одно- и многопролетные
по типу крепления полотнища	С одним верхним несущим тросом и тросовой сеткой; с плоской и пространственной вантовыми системами; с одним или несколькими несущими плавучими поясами (поплавками)

Приведенную классификацию не следует считать завершенной. По мере развития конструкций тканевых сооружений она может совершенствоваться и развиваться.

Составные элементы плотины из мягких тканевых материалов: несущая оболочка из мягкой ткани; анкерные устройства, обеспечивающие закрепление оболочки; система трубопроводов и насосно-вентиляторного оборудования (для плотин наполняемого типа) для наполнения и опорожнения оболочки; датчики для контроля работы конструкции и управления системой питания и опорожнения плотины.

Несущие оболочки выполняют из резинотканевых, пленочно-тканевых и пленочных материалов. Наибольшее применение получили выпускаемые оте-

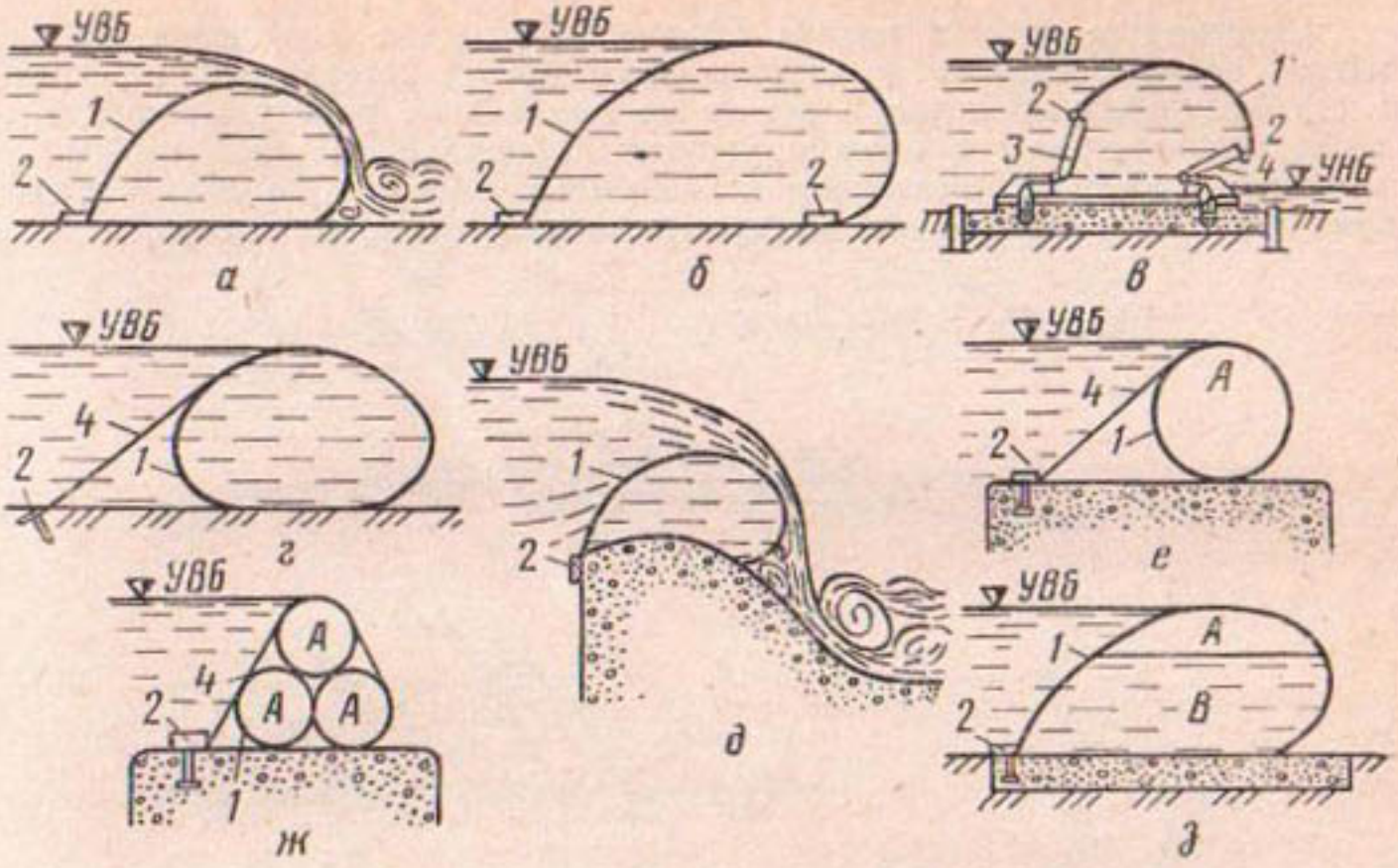


Рис. 4.34. Конструктивные схемы замкнутых оболочек:

а, б, в, г — то же на флютбете с закреплением по одной образующей, по двум образующим, на двух образующих с шарнирными поплавковыми опорами (створками), с удержанием тросами или полотнищем; *д* — то же на водосливе; *е, ж* — воздухонаполняемые с удержанием тросами или полотнищем, одно- и многооболочечная; *з* — водовоздухонаполняемая; А — воздух; В — вода; *1* — оболочка; *2* — анкерный зажим; *3* — шарнирная поплавковая опора; *4* — удерживающее полотнище или трос

чественной промышленностью резинотканевые материалы, обладающие следующими положительными свойствами: длительной по времени высокой прочностью на растяжение и прокалывание; герметичностью, гибкостью, слабой деформированностью; высоким сроком службы (15...20 лет).

Анкерное устройство для устойчивого положения оболочки на флютбете состоит из металлической плиты (или полосы), бруса и болтов, прижимающих (вместе с брусом) полотнище к флютбету.

Система наполнения и опорожнения оболочек при водяном заполнителе бывает самотечная, принудительная или комбинированная.

Основные требования к материалам тканевых плотин: материал для изготовления несущих оболочек мягких плотин должен обладать достаточной прочностью на растяжение и прокалывание, слабой деформированностью, быть воздухо- и водонепроницаемым, достаточно гибким при изгибе, долговечным, то есть стойким к различным воздействиям (химическим, биологическим, солнечной радиации, высоким и низким температурам и испарению). Для изготовления резинотканевых, пленочно-тканевых и пленочных оболочек мягких плотин и других сооружений используют два компонента: прочную основу — ткань (наиболее перспективна капроновая и лавсановая) и эластичный герметизатор (резина, пленка, пластик). Большую роль играет правильное сочетание ткани и герметизатора.

Число слоев ткани оболочки может быть от одного до четырех. Для обеспечения герметизации ткань с обеих сторон покрывают водонепроницаемым материалом, который должен быть плотно сцепленным с волокнами ткани, а с другой — эластичным. Для этого чаще всего используют резину (каучук, неопрен). В многослойных оболочках между отдельными слоями ткани располагают также водонепроницаемые связующие прокладки из различных типов герметиков в зависимости от требований, предъявляемых к материалу. Конструктивные схемы материалов даны на рисунке 4.36. Особое внимание необходимо обращать на конструкции стыков при склеивании полотнищ мягких оболочек.

Особенности расчета мягких оболочек. Исходные допущения: усилия в мягкой несущей оболочке относят к ее срединной поверхности; собственную массу материала оболочки в расчет не принимают; работу материала оболочки рассматривают в области упругих деформаций. Первоначальным растяжением материала пренебрегают, конечные стадии расчета оболочки выполняют с учетом растяжимости материала; внешние нагрузки и внутреннее дав-

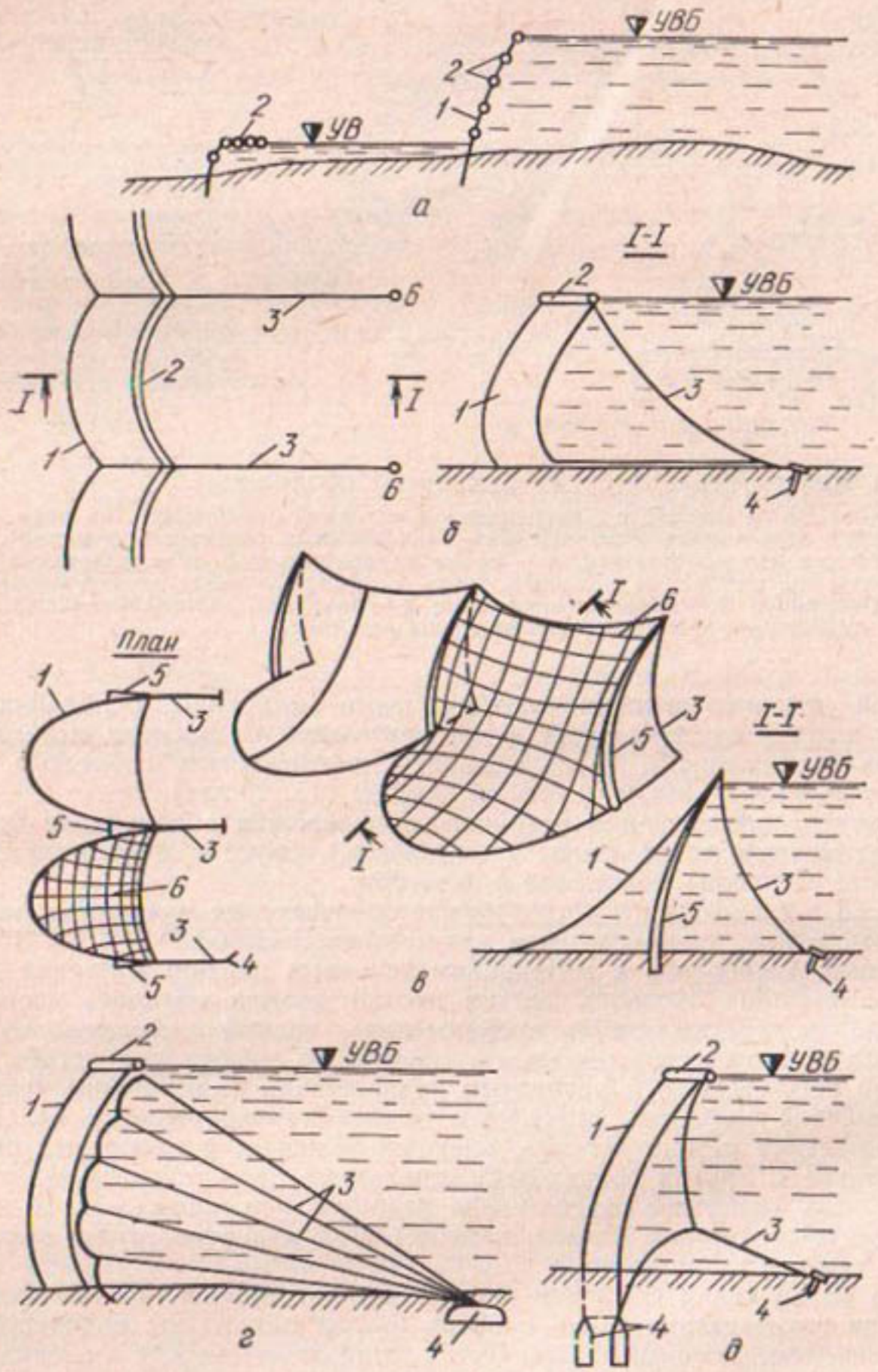


Рис. 4.35. Конструктивные схемы открытых (парусных или мембранных) плотин:

а — многопоплавковая с двойным делением напора; *б* — многопролетная с одним плавучим несущим поясом (поплавком); *в* — многопролетная с тросовантовой системой и пилонами; *г, д, е* — однопролетная и многопролетная с поплавками; *ж, з* — одно- и многопролетные без поплавков: *1* — полотнище; *2* — поплавки; *3* — удерживающие тросы; *4* — анкерный зажим; *5* — пилон; *6* — ванты

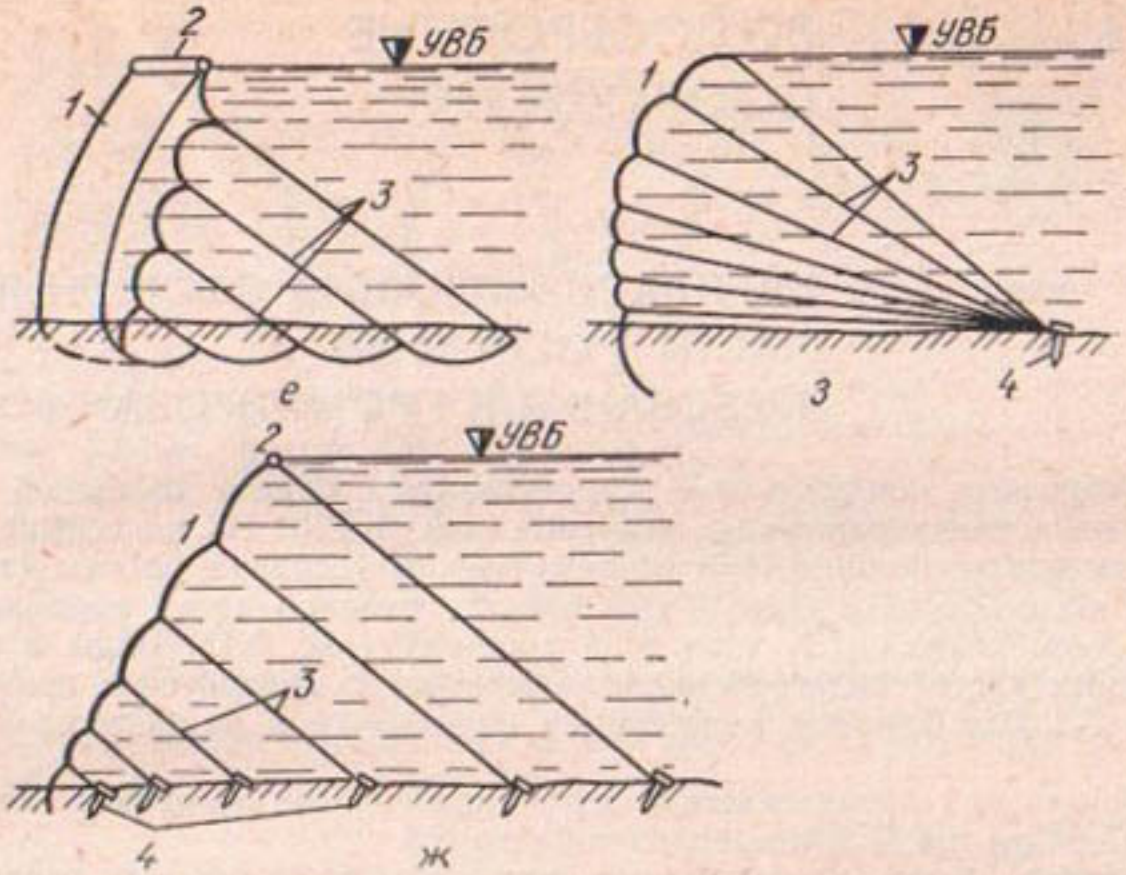
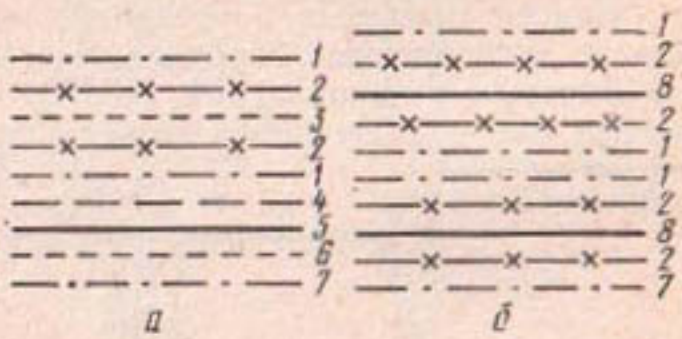


Рис. 4.35. (продолжение)

Рис. 4.36. Конструктивные схемы резинотканевых материалов отечественного производства:

а — однослойного; *б* — двухслойного (дублированного): *1* — обкладка ИРП-1247; *2* — пропитка (промазка) клеем КХ-2; *3* — пленка ПКРТ-3; *4, 6* — промазка ИРП-1186 и ИРП-1247; *5, 8* — капроновая ткань АП-2 и 1547; *7* — обкладка ИРП-12487



ление в оболочке принимают распределенными и плавно изменяющимися. Расчет наполняемой замкнутой оболочки проводят как расчет гибкого кольца, загруженного распределенной плавно изменяющейся нагрузкой, в условиях плоской задачи. Для заданной формы оболочки в конечном состоянии и действующих на нее нагрузок определяют напряжения и начальную форму оболочки. Для полученной начальной формы оболочки, заданных нагрузок и условий закрепления находят напряжения и конечную форму. По найденному конечному состоянию оболочки (форма, нагрузки и напряжения) определяют новую форму и напряжение в оболочке при действии дополнительных нагрузок.

Глава 5 ВОДОСБРОСНЫЕ СООРУЖЕНИЯ

5.1. КЛАССИФИКАЦИЯ, СОСТАВНЫЕ ЧАСТИ И ОСНОВНЫЕ ТРЕБОВАНИЯ К ПРОЕКТИРОВАНИЮ

Водосбросные сооружения — устройства для сброса излишков паводковых вод или целенаправленных попусков воды в НБ. Их классифицируют по общим признакам (табл. 5.1) и гидравлическим условиям работы (табл. 5.2). В состав водосбросного сооружения входят: входная часть, водопроводящий тракт и сопряжение с НБ (концевой участок) (рис. 5.1). Виды и конструкции входных частей водосбросов, водовыпусков и водоспусков приведены на рисунках 5.2...5.5. Типовые конструкции водовыпусков мелиоративных систем см. гл. 7.

Сравнительная характеристика типов водосбросов различной конструкции водопроводящей части приведена в таблице 5.3.

Ориентировочную область применения типов водосбросных сооружений в компоновках гидроузлов с глухими плотинами определяют по графику В. М. Семенкова (рис. 5.6).

Классы основных и резервных водосбросных сооружений, см. гл. 1. Основные водосбросные сооружения I, II и III классов оборудуют контрольно-измерительной аппаратурой (КИА), на сооружениях IV класса ее устанавливают при надлежащем обосновании.

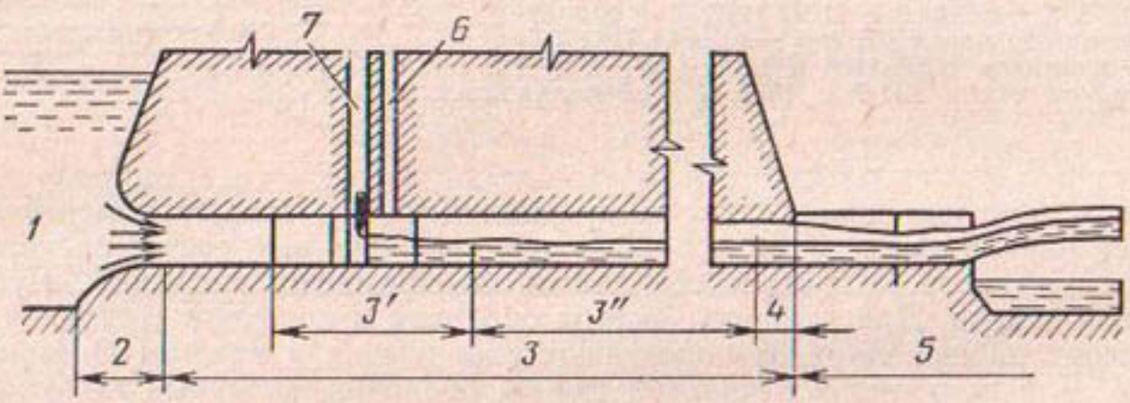


Рис. 5.1. Составные участки водосбросного сооружения (трубчатого):

1 — подводящий участок; *2* — входная часть (входной оголовок); *3* — водопроводящий тракт; *3′* — камера затворов; *3″* — отводящий участок; *4* — концевой участок; *5* — сопряжение с НБ; *6* — аэрационная шахта; *7* — шахты с затворами

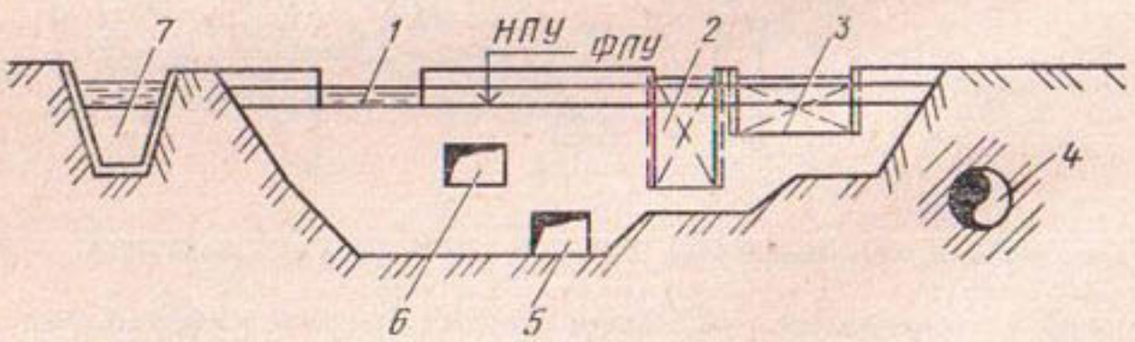


Рис. 5.2. Виды входных отверстий:

1 — поверхностное (водосливное) нерегулируемое; *2, 3* — поверхностные глубокое и регулируемое; *4* — береговой туннельный водосброс; *5* — глубинное донное; *6* — глубинное; *7* — береговой поверхностный водосброс

Рис. 5.3. Входные части открытых береговых водосбросов:

а — сужающаяся с прямолинейным водосливным порогом; *б* — с циркульным очертанием порога; *в* — с зигзагообразным гребнем; *г* — с криволинейным гребнем; *д* — сужающаяся с криволинейным гребнем и усиленной шероховатостью; *е* — с лабиринтным водосливным порогом; *ж* — с веерообразным мексиканским порогом

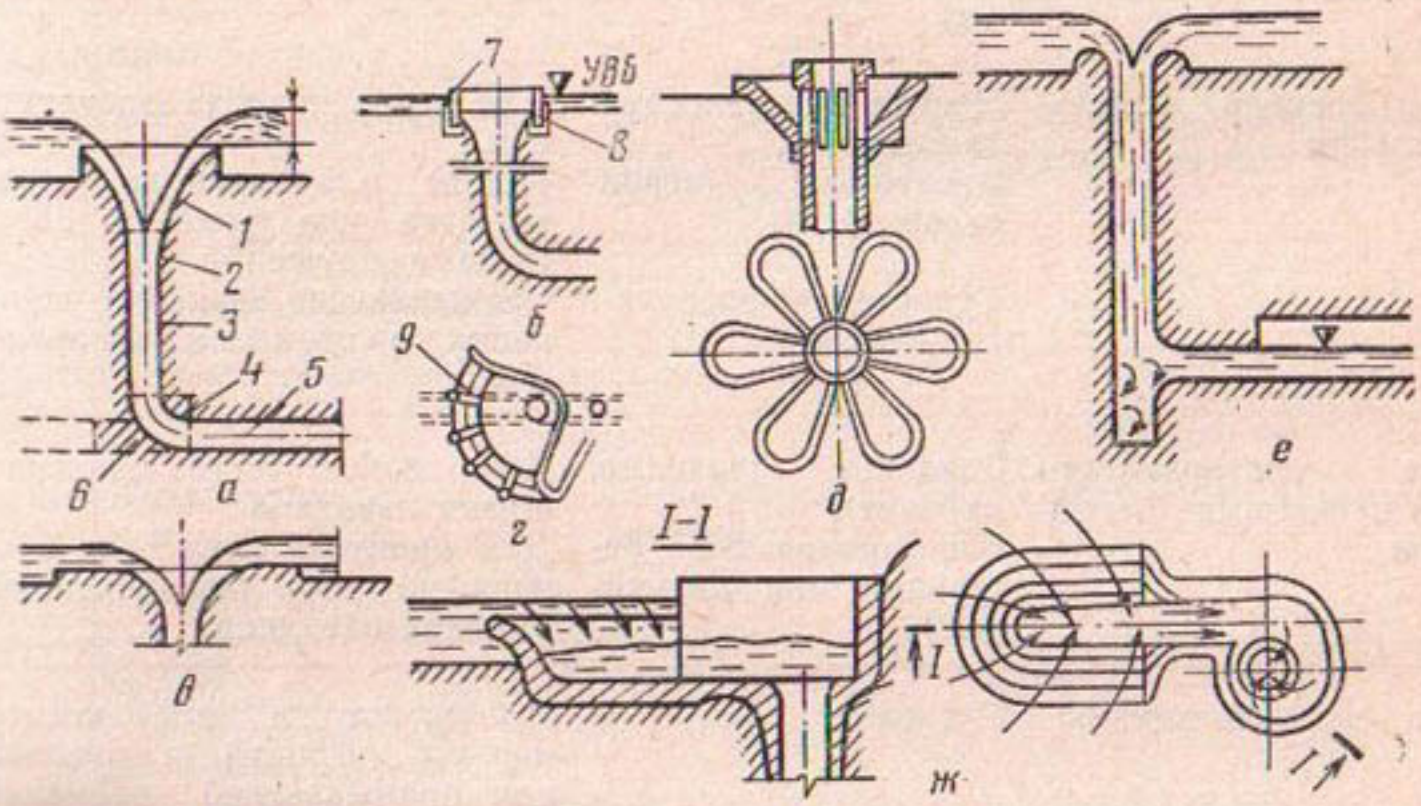


Рис. 5.4. Шахтные водосбросы:

а — с воронкой практического профиля и цилиндрической шахтой; *б* — с воронкой практического профиля и опускным цилиндрическим затвором; *в* — с плоским кольцевым гребнем (слева) и конической вставкой (справа); *г* — с неполной кольцевой воронкой; *д* — с лепестковой воронкой (маргаритка); *е* — с глубоким шахтным колодцем (колодцем-стаканом); *ж* — со спиральной камерой; *1* — воронка; *2* — переходной участок; *3* — шахта; *4* — колено; *5* — отводной туннель; *6* — пробка; *7* — цилиндрический затвор; *8* — кольцевой водослив; *9* — струенаправляющие быки

Требования к проектированию. Основное требование — обеспечить устойчивый режим потока в пределах проточной части: напорный или безнапорный. Переходные (частично напорные) режимы допускаются лишь при постепенном переходе из безнапорного режима в напорный и обратно без значительных пульсационных воздействий. Рекомендуемые гидравлические режимы для различных участков водосбросов приведены в таблице 5.4.

При проектировании невихревых шахтных водосбросов следует исключать образование неорганизованного закрученного потока в воронке, снижающего пропускную способность сооружения и ухудшающего режим работы шахты (противоводоворотные стенки, двухперепадные воронки и пр.).

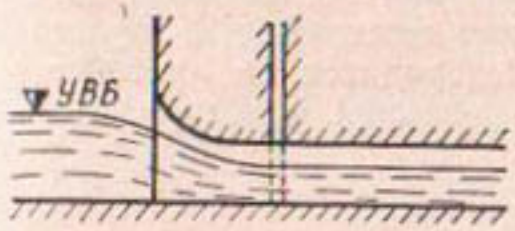
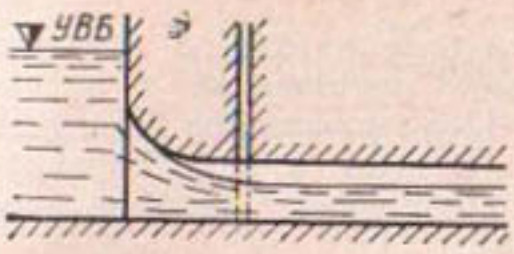
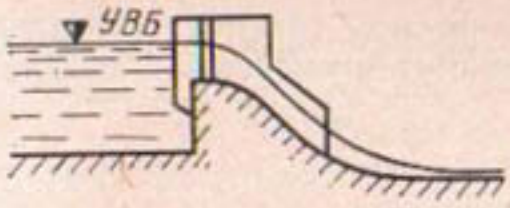
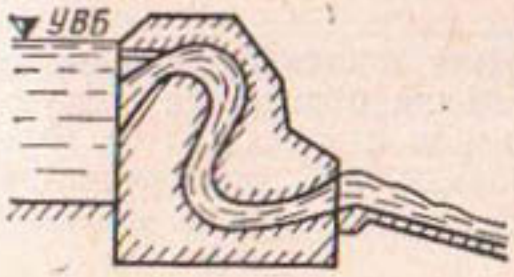
5.1. Классификация водосбросных сооружений по общим признакам

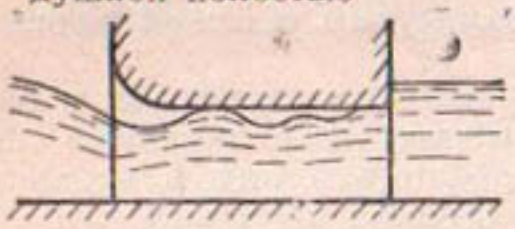
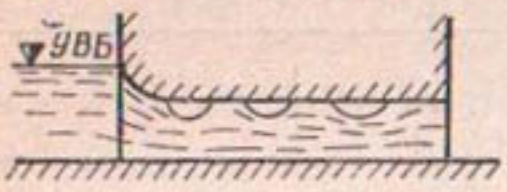
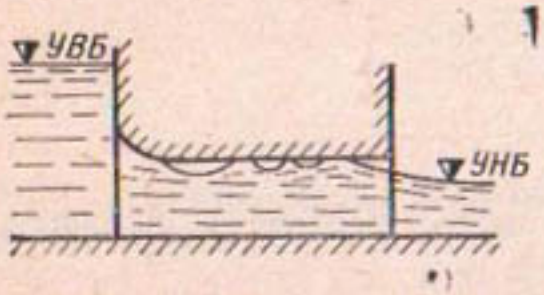
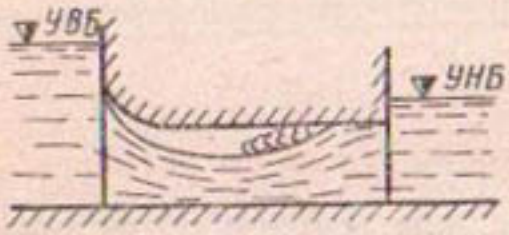
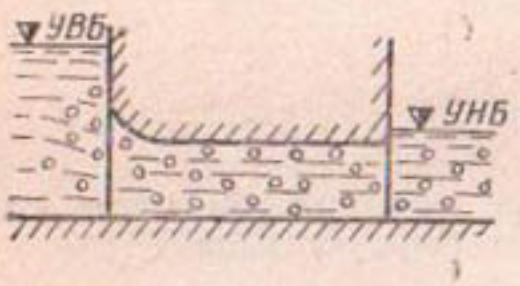
Признак классификации	Сооружение	Назначение
По функциональному назначению	Водосбросы	Сооружения для сброса воды из ВБ во избежание его переполнения. Можно использовать для пропуска льда, шуги и других плавающих тел, а также для промыва ВБ от наносов
	Водовыпуски	Сооружения для полезных попусков воды из ВБ в канал, трубопровод, русло реки
	Водоспуски (иногда одновременно используют и как водовыпуски или водосбросы)	Сооружения для полного или частичного (предпаводкового, аварийного) опорожнения водохранилищ
По времени использования	Постоянные (эксплуатационные)	Для всего периода эксплуатации
	Временные (строительные)	Только для периода строительства или ремонта постоянных сооружений
	Строительно-эксплуатационные	Совмещающие функции постоянных и временных сооружений
По повторяемости пропускаемых паводков	Основные (главные, рабочие)	Для сброса часто повторяющихся паводков
	Вспомогательные (резервные или аварийные)	Для пропуска совместно с основными редко повторяющихся высоких паводков
По местоположению	Русловые	Размещают в пределах напорного фронта в русловой или примыкающей пойменной частях русла, непосредственно в теле или на поверхности плотины
	Береговые	Открытые (крепленые каналы, быстротоки, перепады) или закрытые (туннельные, трубчатые) водоводы в коренных берегах речной долины
	Пойменные	Участок речной поймы, используемый как резервный водосброс для пропуска части расхода в обход гидроузла
По оборудованию водосливных отверстий	Регулируемые	Оборудованные затворами, механизмами и средствами для управления ими
	Нерегулируемые (автоматического действия)	Без затворов или с затворами, отрегулированными на их поднятие при достижении уровнем воды заданной отметки

Продолжение

Признак классификации	Сооружение	Назначение
По конструкции поперечных сечений	Открытые (поверхностные)	С незамкнутым поперечным сечением водовода
	Закрытые	С замкнутым сечением водовода
	Комбинированные	С участками открытыми и закрытыми, расположенными последовательно или в несколько ярусов

5.2. Классификация водосбросов по гидравлическим условиям работы

Тип и схема классификации	Характерная особенность
По условиям на входе:	
с незатопленным входом 	Вода касается лишь части входного сечения и имеет в его пределах свободную поверхность
с затопленным входом 	Вода касается всего периметра входного сечения
По гидравлическому режиму:	
безнапорный 	Режим движения, при котором поток имеет свободную поверхность
напорный 	Режим движения, при котором поток со всех сторон имеет твердую границу

Тип и схема классификации	Характерная особенность
Переходный (частично напорный):	
устойчивый с замкнутой воздушной полостью 	Возникает при глубинах потока больше критических в случае подтопления со стороны НБ
устойчивый с незамкнутой воздушной полостью 	Возникает на участке смены режимов течения в потоке при глубинах потока больше критических и отсутствии подтопления со стороны НБ
неустойчивый (пробковый) с непрерывным образованием и перемещением воздушных полостей и пузырьков воздуха 	Возникает на участке смены режимов течения в потоке при глубинах меньше критических и отсутствии подтопления со стороны НБ. Опасен значительной пульсацией давления. Переводится в устойчивый режим при специальной конструкции оголовка
неустойчивый с гидравлическим прыжком в водоводе 	Возникает при глубине потока за входным отверстием меньше критической и затопленном выходе. Поддерживается в случае притока воздуха в полость над безнапорным потоком. Значительная пульсация давления за прыжком
эмульсионный 	Возникает в поперечном сечении, затопленном водой с мелкими пузырьками воздуха
кольцевой — с закруткой потока	Поток прижимается к стенкам, а в центральной части сечения образуется воздушное ядро (жгут) или отжимается от нижней выпуклой поверхности, прижимаясь в верхней вогнутой, с интенсивной аэрацией струи снизу
По напору:	
низконапорные ($H<12$ м)	
средненапорные ($12<H<60$ м)	
высоконапорные ($H>60$ м)	

5.3. Водосбросные сооружения

Водосброс	Водопроводящие части	Область применения и особенность
	Открытые	
Русловой	Водослив с широким порогом, практического профиля, с носком-уступом, носком-трамплином, сопряжение с НБ	Земляные, каменно-набросные, бетонные плотины. Требуют сложных устройств для сопряжения с грунтовым телом плотины
Береговой (на одном, реже на обоих берегах) (см. рис. 5.3)	Подводящий канал; водослив с фронтальным входом, полигональным или криволинейным порогом, кольцевой воронкой; отводящий канал и сопрягающее сооружение в виде быстротока или многоступенчатого перепада для гашения энергии	Гидроузлы с грунтовыми, контрфорсными глухими и арочными плотинами при максимальных сбросных расходах до 5000 м³/с. Низкие глухие плотины с временным затоплением земель в паводок. На реках ливневого питания с быстрыми развитием и спадом паводка. На небольших гидроузлах, удаленных от населенных пунктов (нерегулируемые)
Траншейный (береговой с боковым отводом воды)	Водосливная часть в виде водослива с широким порогом или практического профиля; траншея; отводящий канал и сопрягающее сооружение (быстроток, перепад, трамплин) с устройством для гашения энергии. Регулируемый или автоматического действия	В скальных и полускальных породах при крутых береговых склонах, затрудняющих размещение берегового водосброса фронтального типа. Регулируемые — при расходах до 8000 м³/с и напоре до 8 м, автоматического действия — при расходах до 600 м³/с, при величине форсированного уровня до 2 м
Пойменный	Участок речной поймы с креплением на размывоопасных участках, иногда пороги (дамбы) и регулирующие сооружения	Резервные водосбросы для пропуска части паводкового расхода в обход гидроузла
	Закрытые	
Трубчатый (см. рис. 5.1):	Входная часть в виде водослива или глубинных отверстий; одна или несколько труб с затворами; выходной оголовок с устройствами для гашения энергии	Водосбросы, водовыпуски, водоспуски в теле грунтовых плотин небольшой высоты, реже в плотинах высотой до 60...80 м
ковшовый	С безвакуумными и вакуумными входными оголовками нерегулируемые	Для пропуска расходов при небольшом повышении уровня в ВБ
сифонный	Ряд изогнутых в вертикальной плоскости труб в теле плотины; входная часть в виде конфузора. Автоматического действия	То же при реконструкции гидроузла для увеличения пропускной способности водосброса. Недостаток — сложность эксплуатации в зимнее время и пропуска плавающих тел

Продолжение

Водосброс	Водопроводящие части	Область применения и особенность
башенный	Трубчатый водосброс с устройством для приема воды и управления затворами в виде башни	Водоспуски и водовыпуски грунтовых плотин средней и небольшой высоты
безбашенный	Трубчатый водосброс с устройством для приема воды и управления затворами в виде камеры, расположенной в галерее	Водовыпуски высоких плотин
Туннельный:	Входная часть — поверхностный водослив или глубинные отверстия; водопроводящий тракт — туннель	Средне- и высоконапорные гидроузлы на скальных основаниях. Сбросные расходы до 5000 м³/с
шахтный (см. рис. 5.4)	Поверхностный водослив с развитой входной воронкой; вертикальный или слегка наклонный водоотводящий тракт (шахта) круглого сечения	Управляемые — при расходах свыше 600...700 м³/с и напорах до 5...6 м; без затворов — при малых расходах и напорах не более 2 м
башенный (см. рис. 5.5)	Туннельный водосброс с входной частью в виде башни	Береговые водоспуски плотин в прочных скальных породах
безбашенный	Туннельный водосброс с входной частью в виде камеры	Предпочтительны в водоспусках высоконапорных гидроузлов
Многоярусный	Туннельные или трубчатые водосбросы с глубинными отверстиями на разных уровнях	Высоконапорные гидроузлы; при вводе гидроузла очередями; пропуске паводковых расходов при большой предварительной сработке уровня ВБ

5.4. Рекомендуемые гидравлические режимы потока на участках водосбросных сооружений

Режим потока	Участки водосброса	Средства обеспечения
Безнапорный	Водопроводящие участки открытых водосбросов; для закрытых водосбросов при сравнительно небольших расходах. Концевые и отводящие участки	Поверхностные водоприемники; затворы в начале трубы или туннеля; увеличение уклона тракта и воздушного пространства над свободной поверхностью потока; подвод воздуха в начале безнапорного участка; одностороннее обжатие потока

Режим потока	Участки водосброса	Средства обеспечения
Напорный	Входные участки трубчатых и туннельных водосбросов. Транзитные участки закрытых водосбросов при пропуске больших расходов (для исключения кавитационной эрозии)	Глубинные отверстия; затворы в конце туннеля. Переменное сечение шахты (особенно по координатам свободно-падающей струи) или цилиндрическая шахта с носком-отклонителем; подвод воздуха (воздуховоды, аэрационные шахты)
Переходный (частично напорный)	Водопроводящие участки — при смене основных режимов работы. Требуют обоснования расчетом или модельными исследованиями	Оголовки специального очертания, устраняющие неблагоприятные режимы потока; «спокойная зарядка» напорного тракта

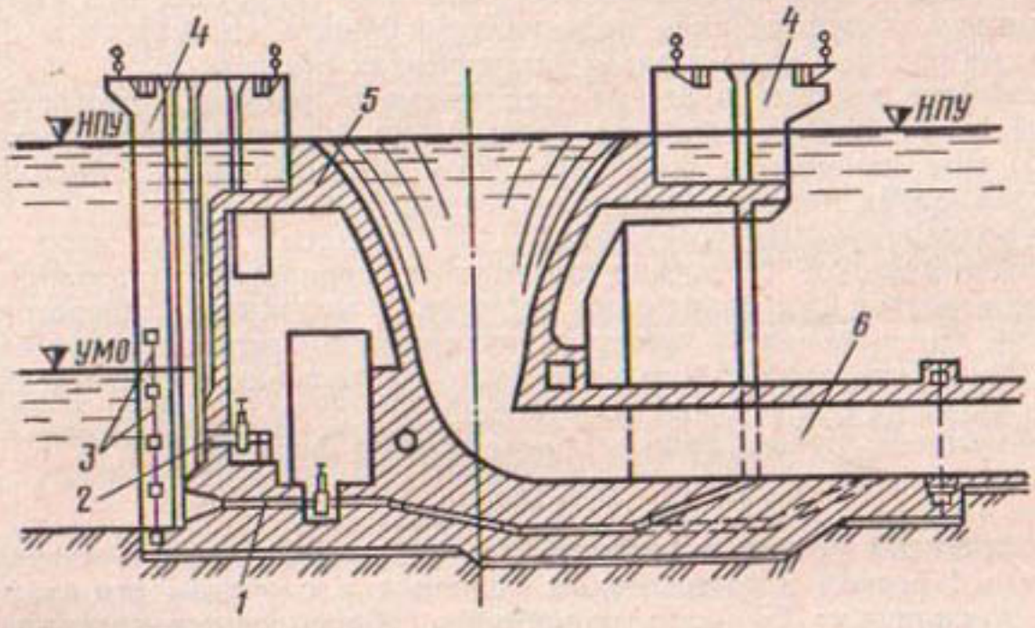


Рис. 5.5. Схема башенного водосброса:

1 — водоспуск; *2* — водовыпуск; *3* — грубая решетка; *4* — быки; *5* — кольцевой водослив; 6 — отводящая галерея, переходящая в туннель

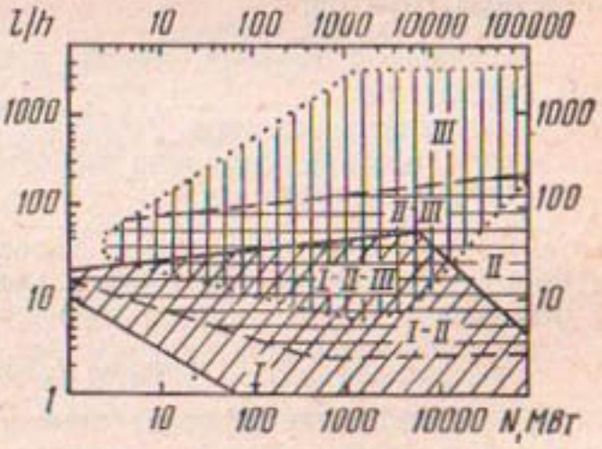


Рис. 5.6. Области преимущественного применения водосбросных сооружений в компоновках с глухими грунтовыми плотинами:

I — туннельный водосброс; *II* — береговые поверхностные и трубчатые водосбросы; *III* — русловые и трубчатые водосбросы; *l* и *h* — длина по гребню и высота плотины, м; $N_{ш} = 0{,}0098\,Qz$, МВт (Q — расход водосброса, м³/с; z — перепад между уровнем воды в ВБ и естественном русле при пропуске паводка)

5.2. ОТКРЫТЫЕ ВОДОСБРОСНЫЕ СООРУЖЕНИЯ

Открытые (поверхностные) водосбросные сооружения имеют незамкнутое поперечное сечение водовода. Гидравлические расчеты необходимы для обоснования ширины водосливного фронта, отметки гребня водосливного порога, очертаний поперечного профиля; назначения координат очертаний поверхностей входных оголовков и быков; длин, высот и конструкций раздельных и сопрягающих устоев; отметок, длин и конструкций понуров и креплений ВБ; выбора рационального режима сопряжения бьефов, назначения отметок, размеров и конструкций элементов крепления НБ; разработки оптимальных схем маневрирования затворами при пропуске через сооружение расчетных расходов воды, льда и плавающих тел; назначения типа и размеров водосбросных сооружений для пропуска расходов строительного периода; прогноза местных размывов и оценки последствий от ожидаемых переформирований русла как в строительный, так и в эксплуатационный период; оценки возможного общего понижения отметок русла реки и НБ в связи с нарушением бытовых условий транспорта наносов; оценки скоростного режима в бьефах и определения давления воды (в том числе пульсационного) на элементы водопропускного сооружения; установления зависимости между расходами и отметками уровней воды в НБ.

Основной расчетный случай (см. п. 1.4) соответствует пропуску расхода водотока всеми водопропускными сооружениями гидроузла при НПУ в ВБ; устанавливают общую ширину водосливного фронта водосброса и определяют удельные расходы воды в различных сечениях его тракта.

Поверочные расчеты проводят для пропуска расхода соответствующей расчетной ежегодной вероятности превышения максимального расхода (см. табл. 1.4) при наивысшем ФПУ. При этом рассматривают несколько возможных вариантов маневрирования затворами.

Для водопропускных сооружений I...III классов обязательно проводят технико-экономическое сравнение возможных вариантов, разработанных с учетом результатов гидравлических расчетов и модельных лабораторных исследований. Сооружения IV класса допускается проектировать на основании результатов их гидравлического расчетного обоснования с привлечением опыта проектирования аналогичных сооружений.

Ширину водосливного фронта определяют по формуле

$$B = Q/q_{adm}, \qquad (5.1)$$

где Q — расчетный расход водосброса, $Q = Q'_{max} - \Sigma Q$ [Q'_{max} — максимальный сбрасываемый расход в естественных условиях и с учетом его трансформации водохранилищем; ΣQ — сумма расходов, сбрасываемых другими водопропускными сооружениями (водовыпусками, водозаборами, рыбопропускными сооружениями и т. д.)]; q_{adm} — допускаемый удельный расход на пороге водослива с учетом геологических, топографических, компоновочных условий, конструкции концевой части и режима сопряжения бьефов, ниже приведен допускаемый удельный расход (м²/с) для предварительных расчетов различных грунтов:

песчаные основания, низко- и средненапорные гидроузлы	25...50
глинистые основания	50...70
полускальные основания	50...90
скальные основания	90...200 и более

Для **пропуска льда через водосбросные сооружения** пролет отверстий b_d сооружений, имеющих быки с вертикальной верховой гранью, вычисляют по формуле

$$b_d = 2{,}75\gamma_f k R_d t / v_d^{2{,}333}, \qquad (5.2)$$

где γ_f — коэффициент формы оголовка быка, зависящий от угла заострения его в плане (табл. 5.5); k — коэффициент неплотности соприкосновения льди-

ны с опорой, $k=0{,}4...0{,}7$ в зависимости от ширины опоры и скорости движения льда; R_c — предел прочности льда при сжатии, принимаемый равным пределу прочности льда при изгибе, при отсутствии данных $R_c=490$ кПа; t — толщина быка; v_d — скорость движения льда в ВБ.

5.5. Коэффициент формы оголовка быка γ_f в зависимости от формы оголовка

Полуцир-кульная или многогран-ник	Прямоуголь-ник	Треугольник с углом заострения в плане, град					
		45	60	75	90	120	150
0,90	1,00	0,54	0,59	0,64	0,69	0,77	1,00

В зоне кривой спада разламывание льдин учитывают снижением b_d на 10...20% по сравнению с рассчитанным по формуле (5.2). Для рек с тяжелым ледоходом принимают $b_d=15...20$ м, а с очень тяжелым — $b_d>20...25$ м.

На реках с тяжелым ледоходом, особенно при строительстве низконапорных гидроузлов, необходимо учесть возможность аккумуляции льда в ВБ, которая может привести к снижению пропускной способности водосбросных сооружений и к дополнительному затоплению. ВБ обычно вскрывается на расстоянии 0,1...0,5 км от водосброса. Движение льда, как правило, начинается при скоростях течения 0,5...1,3 м/с. Задержание льда в водохранилище на несколько суток приводит к интенсивному его таянию и потере прочности ледяного покрова. Объем льда, подлежащего сбросу в НБ, сокращается за это время в несколько раз. При необходимости пропуска льда через глубинные отверстия, а также отверстия туннельных водосбросов и трубчатых водовыпусков следует предусматривать мероприятия для максимально возможного снижения толщины и прочности льда, усиления процесса дробления ледяных полей до льдин, размеры которых обеспечивают возможность подныривания их в отверстия.

Для облегчения условий пропуска льда через пролеты низкопороговых водосливных плотин перед основным водосливным порогом устраивают дополнительный (рис. 5.7), обеспечивающий сосредоточенный перепад уровней и разлом ледяных полей до их встречи с быками плотины. Ширину водосливных пролетов в этом случае определяют по зависимости

$$b_d = 0{,}022R_f l_d q / v_d^2 \rho_d, \qquad (5.3)$$

где R_f — предел прочности льда на изгиб, $R_f=0{,}20...0{,}25$ мПа; l_d — длина отломившейся части льдины; ρ_d — плотность льда; v_d — скорость движения льда в ВБ перед сооружением.

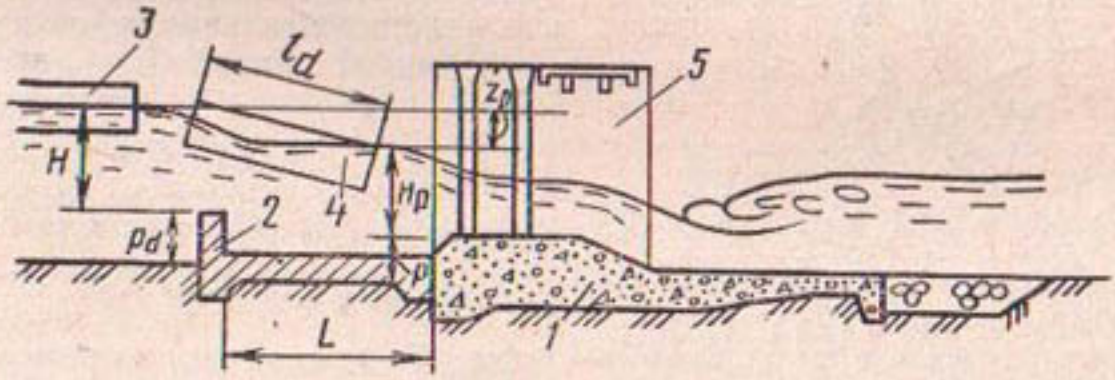


Рис. 5.7. Низкопороговая водосливная плотина с дополнительным порогом для разлома ледяных полей:

1 — водосливная плотина; *2* — порог для разлома ледяных полей до их встречи с быками плотины высотой p_d; *3, 4* — соответственно ледяное поле и отломившаяся в зоне возникновения перепада часть льдины l_d; *5* — быки плотины

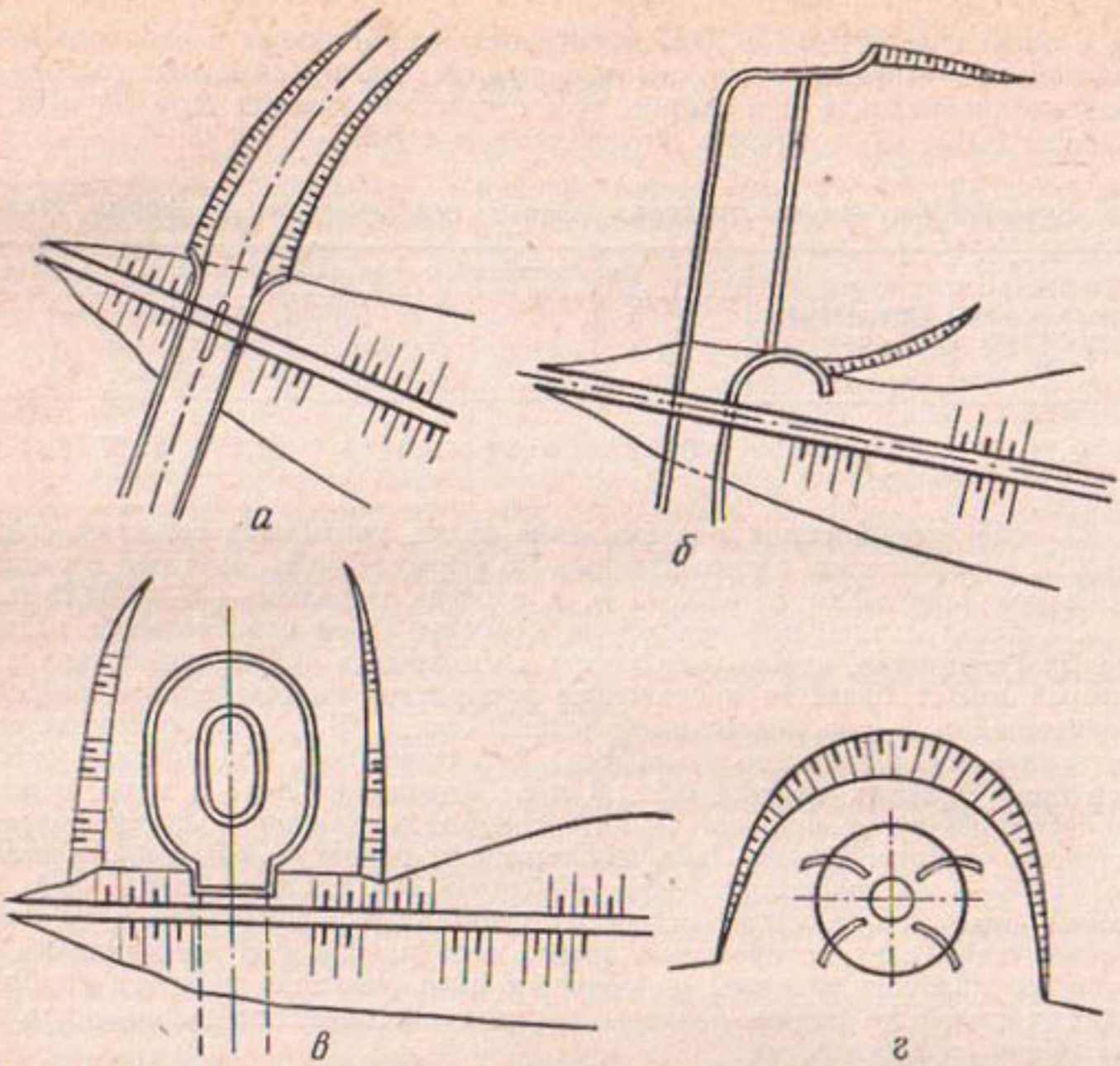
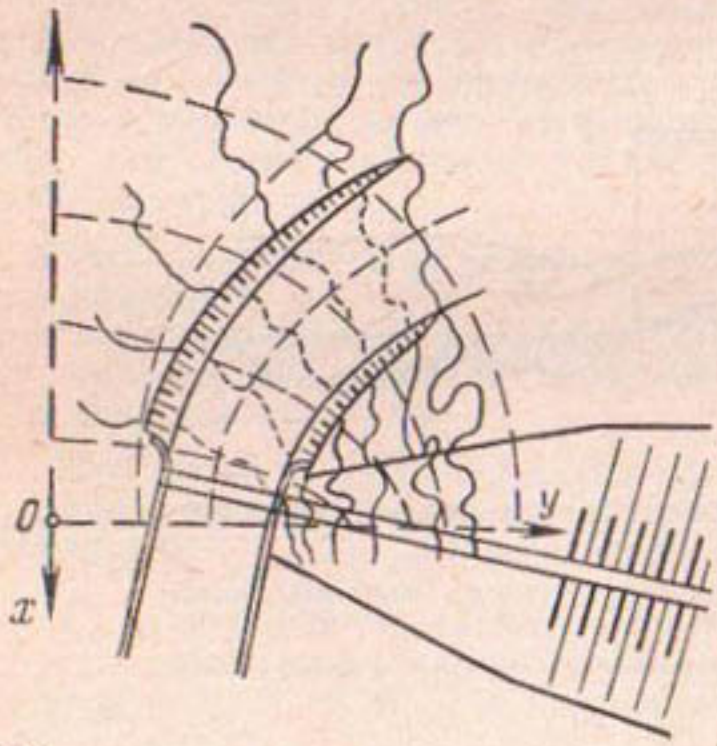


Рис. 5.8. Схемы подводящих каналов открытых береговых водосбросов:

а, б, в — соответственно с фронтальным, боковым и кольцевым подводом потока к водосливному порогу головной части; *г* — подводящий канал шахтного водосброса

Расстояние от водосливного порога до порога для разлома ледяных полей

$$L = a - 2l_h/3 + (1\ldots2)\,H_p, \qquad (5.4)$$



где a — путь, пройденный льдиной; l_h — горизонтальная проекция участка кривой спада; H_p — напор на водосливном пороге. Минимальное расстояние L_{min} определяют при $a \approx l_d$.

Высоту порога p_d вычисляют по зависимости (см. рис. 5.7)

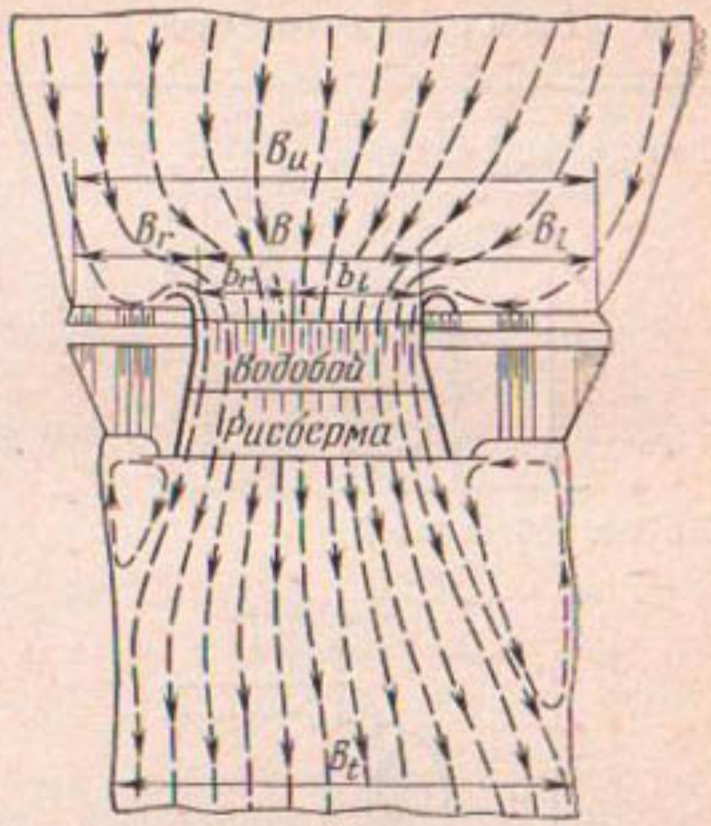
$$p_d = H_p + p + z_p - H, \qquad (5.5)$$

где H — напор на пороге для разлома ледяных полей; z_p — перепад уровней воды над порогами.

Рис. 5.9. Схема подводящего канала, запроектированного адекватно фрагменту сетки потенциального потока

Рис. 5.10. План течений в ВБ и НБ у водосброса (*а*) и диаграмма для предварительного выбора типа сопрягающих открылков (*б*):

B_u, B_i — ширина водотока в ВБ и НБ сооружения; B, B_i — ширина водного потока в створе водослива и в створе, перекрытом глухими сооружениями ($B_i=B_r$ для правого устоя, $B_i=B_l$ — для левого); b_r, b_l — ширина правого и левого пролетов водослива; h_u — глубина водотока в ВБ, $h_u=H+p$ (H — напор на водосливе; p — высота порога)



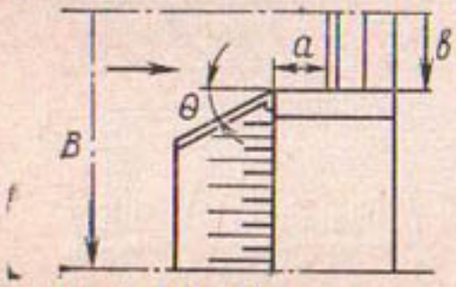
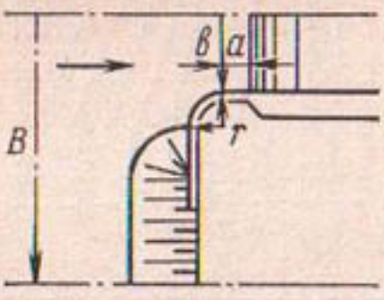
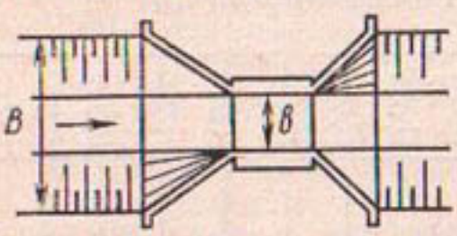
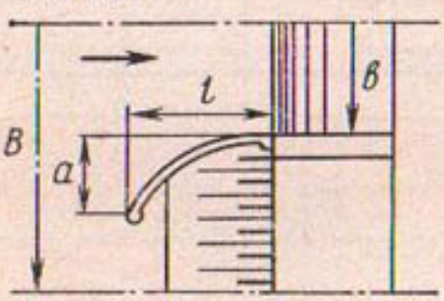
а

Открылки	Схема открылка	Отношение H/h_u 0,0 0,1 0,2 0,3 0,4 0,5 0,6 0,7 0,8 0,9 1,0
Открылок эллиптический или близкого к нему очертания	a, b; $l/a=1,5...3$	Зона открылков для $B_i/h_u>25$
Обратная стенка с эллиптическим конусом и закруглением угла	m, m_1; $m>m_1$	открылков для $B_i/h_u>5$
То же, но с круговым конусом	m, m; $m=3...5$	для $B_i/h_u>5$ и Зона открылков для $B_i/h_u\leq5$
Открылок комбинированного очертания	α, α; $\alpha=30...45°$	
Открылок кругового очертания с центральным углом дуги $\alpha=90°$	$90°$, R	
Ныряющая стенка		$B_i/h_u\leq10$

$20<B_i/h_u\leq25$ $15\leq B_i/h_u<20$ $10\leq B_i/h_u<15$

б

5.6. Некоторые типы конструкций верховых открылков устоев

Тип и схема конструкции	Размеры
С ныряющей стенкой 	$\theta \approx 30°$; $\operatorname{ctg}\alpha = 2...4$; $0 < a < 2H_{lim}$
С обратной стенкой 	a и $r > H_{lim}$ $m = 0{,}3 + 0{,}08\, bH/S_u$
С косыми плоскостями 	$m = 0{,}3 + 0{,}08/(1 + 2b \operatorname{ctg}\theta)$
С криволинейной в плане эллиптической стенкой 	Длина большой полуоси l $l/H = 6/(P/H + 1)$ при $m_1 \leqslant 0{,}1...0{,}15 m_2$ $1{,}75 < p/H < 4{,}2$ Длина малой полуоси $a = l/2{,}5$ при $b_i/B_i \leqslant 0{,}25$ $a = l/2{,}8$ при $b_i/B_i \approx 0{,}5$ $a = l/3$ при $b_i/B_i \geqslant 0{,}5$ Координаты напорной грани $y/a = 1 - \sqrt{1 - (x/l)^2}$

Примечание. H_{lim} — предельный напор на сооружение; H, p — напор и высота порога водослива; m, m_1, m_2 — коэффициент расхода водослива, крайнего пролета и пролета без бокового сжатия потока; b_i, B_i — ширина пролета и перекрытого створа; α — угол наклона стенки к горизонту; θ — угол раструба стенок.

Подводящие каналы открытых водосбросных сооружений обычно имеют схемы, приведенные на рисунке 5.8. Наиболее благоприятный подход к головной части берегового водосброса обеспечивается при адекватности подводящего канала в плане фрагменту сетки движения потенциального потока. Береговые контуры канала соответствуют линиям тока, а фронт порога и входное сечение канала — эквипотенциалям (рис. 5.9). Дно канала в зависимости от конкретных условий можно принять как горизонтальным, так и с прямым или обратным уклоном (соответственно к реке или к водохранилищу).

Водосбросы с боковым подводом потока, как правило, располагают на крутых берегах, размещая водосливной порог вдоль горизонталей. Поэтому

5.7. Значения m_1/m_2 для крайних пролетов отверстий водосброса при $b/H=4{,}8$ и совершенном сжатии потока в плане $b/B<0{,}2$

Струенаправляющее сооружение	p/H (H/h_u)			
	4,2 (0,192)	2,0 (0,333)	1,0 (0,500)	0 (1,00)
С ныряющей стенкой	0,980	0,950	0,888	0,771
С обратной стенкой	0,980	0,957	0,891	0,781
С незатопляемой эллиптической стенкой, выходящей за пределы верхового откоса грунтовой плотины	0,990	0,961	0,888	0,785
С незатопляемой эллиптической стенкой, сопрягающейся с верховым откосом грунтовой плотины круговым конусом	0,998	0,963	0,898	0,800
С ныряющей стенкой и незатопляемым эллиптическим пирсом	0,990	0,940	0,882	0,771

Примечание. b — ширина водосливного фронта пролета; B — ширина водотока в створе водослива; H — напор водослива.

их подходные каналы коротки и не требуют больших выемок. Глубину потока в канале, подводящем воду к порогу траншейного водосброса, назначают 1,5...2 H, где H — напор на пороге водослива. Задачей гидравлического расчета в этом случае является определение оптимальных параметров верховых открылков устоев на подходах потока к водосливному порогу, устройство которых позволяет устранить боковое сжатие в краевых зонах водослива. Тип верхового открылка рекомендуется выбирать по диаграмме (рис. 5.10) в зависимости от кинетичности водного потока H/h_u и степени его стеснения B_1/h_u.

Очертания струенаправляющих открылков устоев на участках подхода потока к водосливным порогам даны в таблице 5.6.

Влияние параметров и конструкции струенаправляющих открылков на пропускную способность крайних пролетов водосброса учитывают с помощью их относительной расходной характеристики m_1/m_2, где m_1 и m_2 — соответственно коэффициенты расхода крайнего пролета и пролета, в котором боковое сжатие практически отсутствует (табл. 5.7).

Для высокой водосливной плотины поверхность боковой стенки крайнего пролета проектируют тех же очертаний, что и боковую поверхность противоположного быка, то есть с раднусом $r=t/2$, где t — толщина быка.

Конструкции креплений подводящего русла при наличии в ВБ легкоразмываемых грунтов показаны на рисунке 5.11. Варианты конструктивных решений крепления начала подводящего канала приведены на рисунке 5.12.

Водосливные пороги бетонных плотин представляют собой обычно водосливы с широким порогом для низкопороговых плотин, быстроток с участком

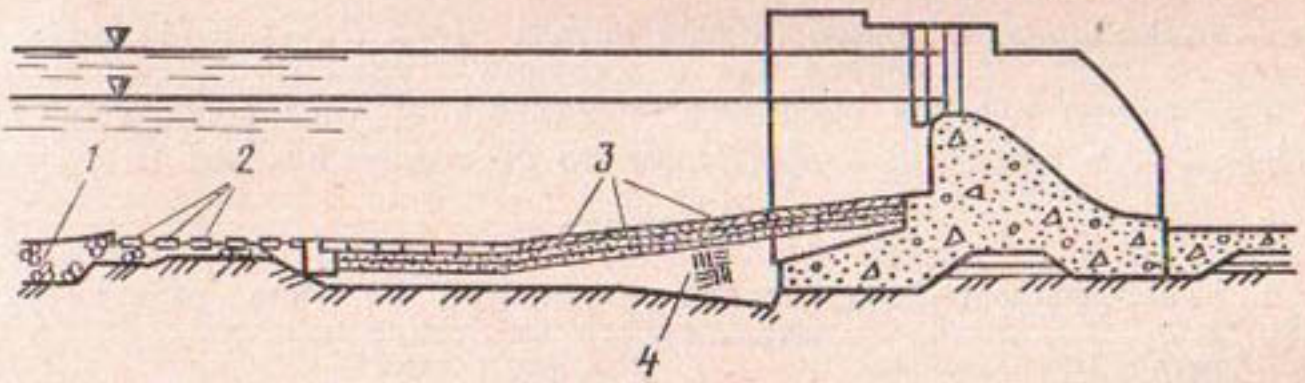


Рис. 5.11. Схема крепления подводящего участка перед водосливной плотиной:

1 — каменная наброска; *2* — бетонные плиты, гибко связанные в продольном и поперечном направлениях, на фашинных тюфяках или два-три слоя каменной наброски; *3* — монолитные бетонные плиты (20×20×0,6 м); *4* — понур

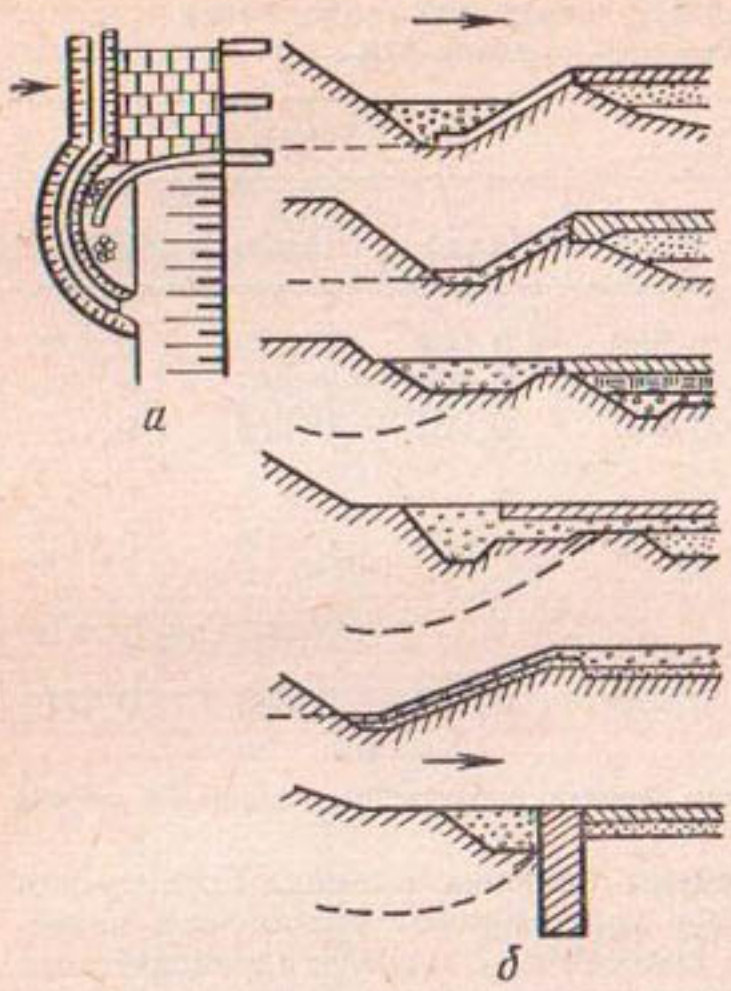
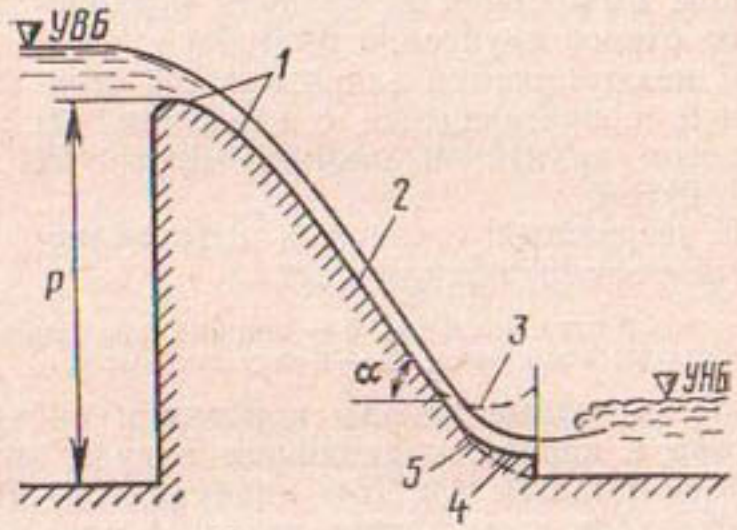


Рис. 5.12. Конструктивные решения креплений в начале подводящего русла у правобережного устоя:
а — план; *б* — разрезы креплений (пунктиром показан контур ожидаемого размыва)

Рис. 5.13. Схема водосливного порога плотины:
1 — водосливной оголовок; *2* — водосливная грань; *3* — трамплин; *4* — сопряжение уступом; *5* — плавное сопряжение



сопряжения в виде плавного криволинейного участка, уступа или трамплина (рис. 5.13) для плотин средней высоты и высоких.

Открытый водосброс с бетонным водосливным порогом может быть с затворами (регулируемый) или без них (нерегулируемый).

Для равномерного распределения пропускаемого расхода по ширине водосливного фронта на низовой грани водосливной плотины устраивают раздельные стенки. Расстояние между ними и их плановая ориентация зависят от принятой ширины водосливного отверстия, профиля поперечного сечения водосливной плотины, типа и конструкции участка сопряжения. В целях улучшения условий эксплуатации водосливной плотины в летнее и зимнее время раздельные быки могут быть выдвинуты в сторону ВБ относительно напорной грани плотины; лобовую грань быков, как правило, выполняют цилиндрической или эллиптической.

Классификация водосливных порогов (водосливов) в зависимости от различных факторов дана в таблице 5.8. По форме сливного отверстия различают водосливы прямоугольные, треугольные, трапецеидальные, круговые.

Пропускную способность неподтопленных водосливов определяют по формуле

$$Q = \varepsilon m b \sqrt{2g}\, H_0^{3/2}, \qquad (5.6)$$

где ε — коэффициент бокового сжатия потока (при $B_н = b$ $\varepsilon = 1$) вычисляют по формуле (5.9); H_0 — напор над водосливом с учетом скорости подхода; m — коэффициент расхода водослива, зависящий от типа водослива.

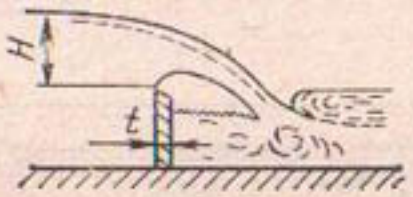
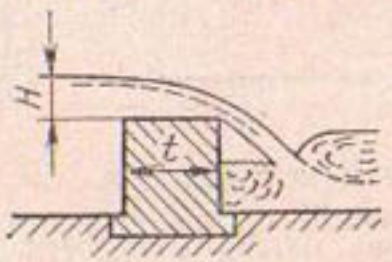
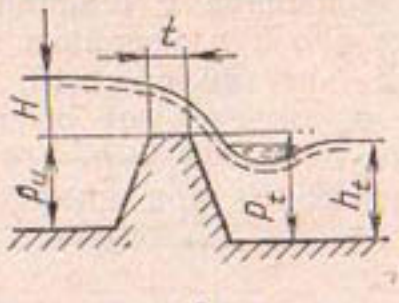
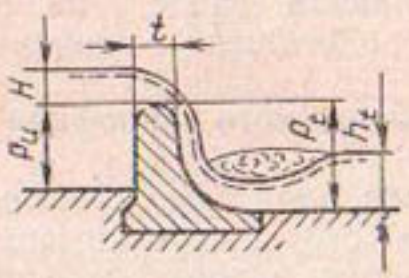
Пропускную способность подтопленного водослива находят из равенства

$$Q_п = \sigma_п Q, \qquad (5.7)$$

где $\sigma_п$ — коэффициент подтопления, зависящий от типа водослива (см. с. 228, 234); Q — расход неподтопленного водослива, вычисленный по формуле (5.6).

Бетонные водосливы с широким порогом имеют горизонтальную поверхность на гребне длиной $t = 2...10\,H$ вдоль потока; любую высоту порога p (в том числе равную нулю); произвольно очерченные верховую и низовую грани (рис. 5.14).

5.8. Классификация водосливов

Признак классификации	Тип и схема водослива	Отличительные признаки
По форме и размерам водосливного порога (поперечное сечение)	С тонкой стенкой 	Толщина стенки t не влияет на характер истечения: $t \leqslant 0{,}67\ H$. Обычно это мерные водосливы
	С широким порогом 	Потерями напора H по длине можно пренебречь: $2\,H \leqslant t \leqslant 8\,H$
	Практического профиля: трапецеидального (полигонального) 	Ширина водослива по верху $0{,}5...0{,}67\ H < t < 2\,H$
	криволинейного 	Верхняя часть гребня и низовая грань имеют плавное очертание
По очертанию водосливной стенки в плане	Прямые или лобовые; косые; боковые; полигональные, круговые криволинейные, замкнутые (в том числе кольцевые)	Очертания зависят от ориентации водослива относительно направления потока
По характеру сопряжения струи с НБ	Неподтопленное	Уровень НБ не влияет на расход и условия перелива воды через порог ($h_t < p_t$, где h_t — уровень воды в НБ; p_t — высота порога со стороны НБ)
	Подтопленное	Уровень НБ влияет на расход и условия перелива ($h_t > p_t$)
По соотношению ширины водослива b и русла B_u в ВБ	С боковым сжатием	$B_u > b$
	Без бокового сжатия	$B_u = b$

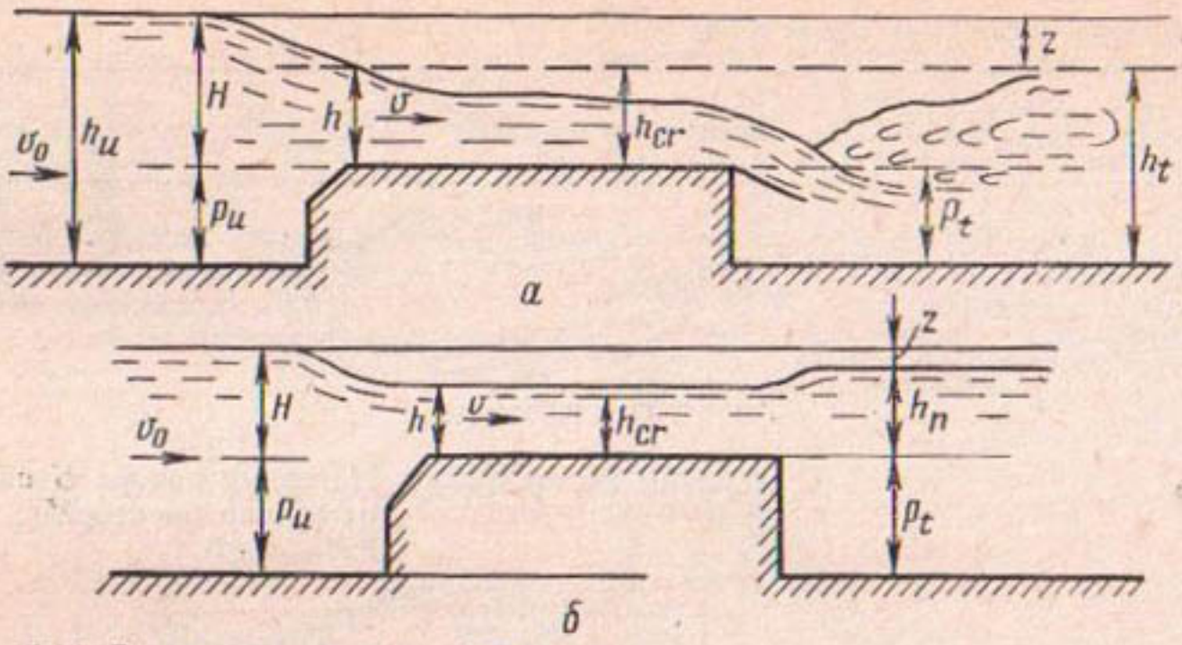


Рис. 5.14. Водослив с широким порогом:

а — неподтопленный; *б* — подтопленный; υ_0, υ — скорость водного потока в ВБ и над водосливом; h_u, h_t, h, h_{cr} — глубина потока в ВБ, НБ, над водосливом, критическая; p_u, p_t — высота порога водослива со стороны ВБ и НБ; z — перепад уровней воды в ВБ и НБ; h_n — глубина подтопления водослива

Коэффициент расхода m водослива с широким порогом без бокового сжатия определяют по таблице 5.9, а в условиях бокового сжатия при $p=0$ и относительном напоре $H/b \leqslant 2$ — по таблице 5.10.

Коэффициент подтопления σ_n определяют по таблице 5.11 в зависимости от относительного подтопления h_n/H_0 ($h_n=h_t-p$) и относительного расширения потока в НБ: $\varepsilon_t=S/S_t=bh_n/S_t$ при коэффициенте скорости $\varphi_n=0{,}9$; S — площадь живого сечения потока, выходящего с водослива; S_t — то же, в НБ.

Водослив с широким порогом подтоплен, если при плавном входе на порог $h_n/H_0>0{,}75$; при неплавном входе на порог — $h_n/H_0>0{,}85$. Более подробно учет подтопления водосливов с широким порогом рассмотрен в курсах гидравлики.

Бетонные водосливы практического профиля представлены на рисунке 5.15.

Водосливы с безвакуумным практическим профилем очерчены по форме нижней поверхности свободной струи, переливающейся через водослив с тонкой стенкой при заданном напоре, который называют *профилирующим* H_f.

Очертание поперечного профиля безвакуумного водослива значительной высоты, когда скорость подхода существенным образом не влияет на его координаты ($p/H_0>0{,}2$), определяют по единичным координатам, представленным в таблице 5.12. Для построения конкретного профиля табличные значения координат умножают на H_f. При $H=H_f$ водослив всегда безвакуумный; при $H>H_f$ — вакуумный.

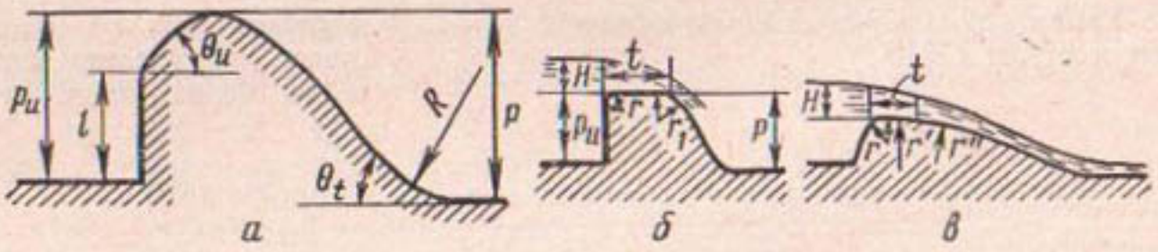
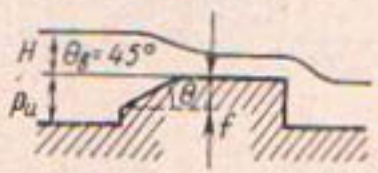
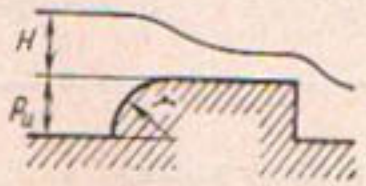


Рис. 5.15. Типы водосливов практического криволинейного профиля:

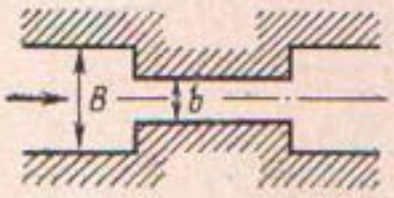
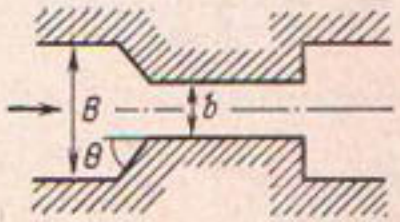
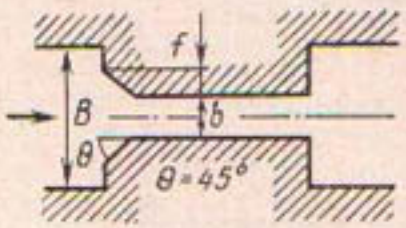
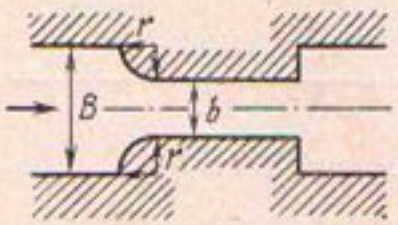
а — очерченные по форме падающей струи; *б* — с уширенным горизонтальным гребнем; *в* — распластанные; l — высота порога до оголовка; p_u; p — высота порога со стороны ВБ и НБ; R — радиус сопряжения водослива с НБ; H — напор водослива; t — толщина оголовка; r, r_1, r', r'' — радиусы закругления оголовка

5.9. Коэффициенты расхода водослива с широким порогом без бокового сжатия

Форма водослива	P_u/H									
	0	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0	2,0	4,0	6,0	∞
	0,385	0,366	0,356	0,350	0,345	0,342	0,333	0,327	0,325	0,320
ctg θ										
0,5	0,385	0,372	0,365	0,361	0,357	0,355	0,349	0,345	0,344	0,340
1,0	0,385	0,377	0,373	0,370	0,368	0,367	0,363	0,361	0,360	0,358
1,5	0,385	0,380	0,377	0,376	0,375	0,374	0,371	0,370	0,369	0,368
⩾2,5	0,385	0,382	0,381	0,380	0,379	0,378	0,377	0,376	0,376	0,375
 f/H или r/H										
 0,025	0,385	0,372	0,365	0,361	0,357	0,355	0,349	0,346	0,344	0,340
0,05	0,385	0,374	0,368	0,364	0,361	0,359	0,354	0,350	0,349	0,346
0,2	0,385	0,377	0,374	0,370	0,368	0,366	0,363	0,360	0,359	0,357
0,6	0,385	0,380	0,377	0,376	0,375	0,374	0,371	0,370	0,369	0,368
⩾1,0	0,385	0,382	0,381	0,380	0,379	0,378	0,377	0,376	0,376	0,375

Примечание. r, f и θ — радиус закругления, высота и угол наклона оголовка водослива.

5.10. Коэффициенты расхода водослива с широким порогом ($p_н = 0$)

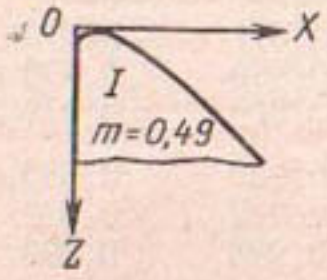
Форма входа в плане		b/B						
		1,0	0,9	0,8	0,6	0,4	0,2	0
	ctg 0	0,385	0,367	0,355	0,340	0,330	0,324	0,320
	0,5	0,385	0,373	0,365	0,356	0,350	0,346	0,343
	1...3	0,385	0,375	0,369	0,361	0,356	0,352	0,350
	f/b							
	0,05	0,385	0,371	0,362	0,350	0,343	0,338	0,345
	0,2	0,385	0,375	0,368	0,360	0,355	0,351	0,349
	$\geqslant 0,5$	0,385	0,378	0,373	0,368	0,364	0,362	0,360
	r/b	0,385	0,367	0,355	0,340	0,330	0,324	0,320
	0,05	0,385	0,371	0,362	0,350	0,343	0,338	0,335
	0,2	0,385	0,375	0,368	0,360	0,355	0,351	0,349
	$\geqslant 0,5$	0,385	0,378	0,373	0,368	0,364	0,362	0,360

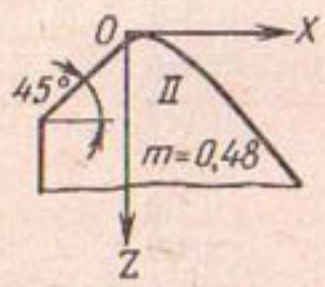
Примечание. B, b — ширина водосливного фронта в створе водослива и пролет водослива.

5.11. Коэффициент подтопления водослива с широким порогом ($\sigma_п \simeq 0{,}9$) в зависимости от относительного расширения потока в НБ

$h_п/H_0$	Относительное расширение потока ε_1								
	1,0	0,8	0,7	0,6	0,5	0,4	0,3	0,2	0
0,75	1	1	1	1	1	1	1	1	1
0,78	0,97	1	1	1	1	1	1	1	0,97
0,80	0,95	1	1	1	1	1	1	1	0,95
0,82	0,92	0,99	1	1	1	1	1	0,99	0,92
0,84	0,89	0,97	0,99	1	1	1	0,99	0,97	0,89
0,86	0,85	0,94	0,96	0,99	1	0,99	0,96	0,94	0,85
0,88	0,81	0,90	0,93	0,97	0,96	0,97	0,93	0,90	0,81
0,90	0,75	0,84	0,88	0,92	0,91	0,92	0,88	0,84	0,75
0,92	0,69	0,78	0,82	0,85	0,84	0,85	0,82	0,78	0,69
0,94	0,61	0,70	0,73	0,76	0,75	0,76	0,73	0,70	0,61
0,96	0,51	0,59	0,62	0,65	0,64	0,65	0,62	0,59	0,51
0,98	0,36	0,44	0,46	0,49	0,48	0,49	0,46	0,44	0,36

5.12. Единичные ординаты y тела безвакуумного водослива практического профиля для двух типов профилей





x	Очертания низовой грани водослива	Очертания струи		Очертания низовой грани водослива	Очертания струи	
		внешняя поверхность	внутренняя поверхность		внешняя поверхность	внутренняя поверхность
0,0	0,126	−0,831	0,126	0,043	−0,781	0,043
0,1	0,036	−0,803	0,036	0,010	−0,756	0,010
0,2	0,007	−0,772	0,007	0,000	−0,724	0,000
0,3	0,000	−0,740	0,000	0,005	−0,689	0,005
0,4	0,007	−0,702	0,007	0,023	−0,648	0,023
0,6	0,060	−0,620	0,063	0,090	−0,552	0,090
0,8	0,147	−0,511	0,153	0,189	−0,435	0,193
1,0	0,256	−0,380	0,267	0,321	−0,293	0,333
1,2	0,393	−0,219	0,410	0,480	−0,120	0,500
1,4	0,565	−0,030	0,590	0,665	−0,75	0,700
1,7	0,873	0,305	0,900	0,992	0,438	1,05
2,0	1,235	0,693	1,31	1,377	0,860	1,47
2,5	1,960	1,50	2,10	2,14	1,71	2,34
3,0	2,824	2,50	3,11	3,06	2,76	3,39
3,5	3,818	3,66	4,26	4,08	4,00	4,61
4,0	4,930	5,00	5,61	5,24	5,42	6,04
4,5	6,220	6,54	7,15	6,58	7,07	7,61

Безопасное (с точки зрения динамического воздействия струи на дно отводящего участка за водосливом) сопряжение поверхности низовой водосливной грани с поверхностью крепления дна НБ имеет вид дуги круга радиусом R (рис. 5.15, *а*), значения которого даны в таблице 5.13.

5.13. Сопрягающие радиусы R (м) безвакуумного водослива в зависимости от его высоты при различных напорах

p, м	Напор H, м									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
10	3,0	4,2	5,4	6,5	7,5	8,5	9,6	10,6	11,6	
20	4,0	6,0	7,8	8,9	10,0	11,0	12,2	13,3	14,3	
30	4,5	7,5	9,7	11,0	12,4	13,5	14,7	15,8	16,8	
40	4,7	8,4	11,0	13,0	14,5	15,8	17,0	18,0	19,0	
50	4,8	8,8	12,2	14,5	16,5	18,0	19,2	20,3	21,3	
60	4,9	8,9	13,0	15,5	18,0	20,0	21,2	22,2	23,2	

5.14. Коэффициент формы σ_f безвакуумного водослива практического профиля в зависимости от l/p_1

θ_u, град	θ_t, град	l/p_1				
		0	0,3	0,6	0,9	1
15	15	0,880	0,878	0,855	0,850	0,933
	30	0,910	0,908	0,885	0,880	0,974
	60	0,927	0,925	0,902	0,895	1,000
45	15	0,915	0,915	0,911	0,919	0,933
	30	0,953	0,950	0,950	0,956	0,974
	60	0,974	0,974	0,970	0,978	1,000
75	15	0,930	0,930	0,930	0,930	0,933
	30	0,972	0,972	0,972	0,972	0,974
	60	0,998	0,998	0,998	0,999	1,000
20	15	0,933	—	—	—	0,933
	30	0,974	—	—	—	0,974
	60	1,000	—	—	—	1,000

Пропускную способность безвакуумного водослива определяют по формуле (5.6) с коэффициентом расхода

$$m = \sigma_f \sigma_H m_{red}, \tag{5.8}$$

где σ_f — коэффициент формы (табл. 5.14), зависящий от углов θ_u, θ_t и отношения l/p (см. рис. 5.15, *а*); σ_H — коэффициент полноты напора (табл. 5.15), учитывающий изменения напора H по сравнению с $H_{\text{пп}}$; m_{red} — приведенный коэффициент расхода водослива практического профиля, m_{red} = =0,5—0,012 H_0/p_u при $H_0/p_u<6{,}5$ и $H_0>0{,}1$ м.

Коэффициент бокового сжатия при приближенных расчетах находят по формуле Е. А. Замарина

$$\varepsilon = 1 - aH_0/(b + H_0), \tag{5.9}$$

где a — коэффициент, учитывающий влияние формы лобовой части устоев или быков (рис. 5.16); b — ширина водосливного отверстия (пролета).

Вакуумные водосливы имеют вблизи гребня область с давлением ниже атмосферного. Они обладают наибольшей пропускной способностью (коэффициенты расхода m=0,51...0,57), более простым и обжатым профилем. Оголовки имеют форму круга или эллипса (рис. 5.17). Чаще используют вакуумные профили с эллиптическими оголовками, имеющими соотношение полуосей эллипса $a/b\simeq 2...3$. Низовая грань плоская, $\operatorname{ctg}\theta_t = {}^2/_3$.

5.15. **Коэффициент полноты напора σ_H в зависимости от угла θ_u** (по Н. П. Розанову и А. С. Офицерову)

H/H_1	θ_u, град					
	15	30	45	60	75	90
0,2	0,897	0,886	0,875	0,864	0,853	0,842
0,4	0,934	0,928	0,921	0,914	0,907	0,900
0,6	0,961	0,957	0,953	0,949	0,945	0,940
0,8	0,982	0,980	0,978	0,977	0,975	0,973
1,2	1,016	1,017	1,019	1,020	1,022	1,024
1,4	1,029	1,032	1,036	1,039	1,042	1,045
1,6	1,042	1,048	1,051	1,055	1,060	1,064
1,8	1,054	1,059	1,065	1,071	1,076	1,082
2,0	1,064	1,071	1,078	1,085	1,092	1,099

5.16. **Координаты вакуумных водосливов практического профиля**

$a/b=1$		$a/b=2$		$a/b=3$	
x	z	x	z	x	z
—1	1	—0,692	0,830	—0,472	0,629
—0,737	0,330	—0,560	0,248	—0,368	0,189
0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
0,585	0,208	0,629	0,226	0,541	0,173
1,377	1,302	1,242	0,730	1,022	0,503
2,434	2,896	1,682	1,278	1,456	0,800
3,670	4,717	2,327	2,246	1,855	1,320
5,462	7,424	2,956	3,189	2,240	1,792
—	—	3,450	5,430	2,580	2,270
—	—	5,299	6,704	3,193	3,214
—	—	—	—	4,685	5,453
—	—	—	—	5,561	6,767

Профиль тела вакуумного водослива практического профиля строят по координатам Н. П. Розанова (табл. 5.16) для фиктивного радиуса вписанной в оголовок окружности $r_f=1$; при $r_f\neq1$ их следует умножить на заданное значение r_f.

Пропускную способность вакуумных водосливов вычисляют по формуле (5.6), используя коэффициенты расхода, приведенные в таблице 5.17.

Подтопление водосливов практического профиля наступает при образовании прыжка в НБ и $h_t>p$ для безвакуумных водосливов или $h_n/H_0>$ $>-0{,}15$ — для вакуумных.

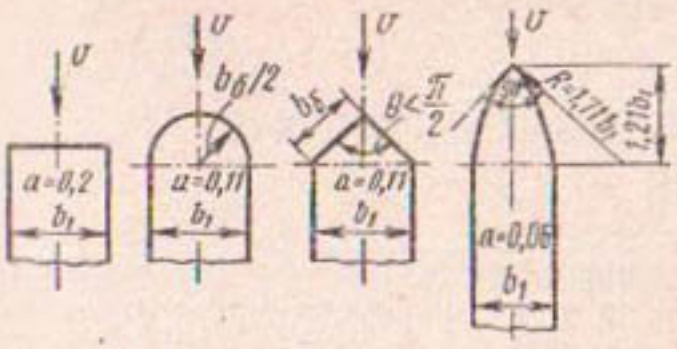


Рис. 5.16. Формы оголовков быков и устоев:
b_1 — ширина быка (устоя)

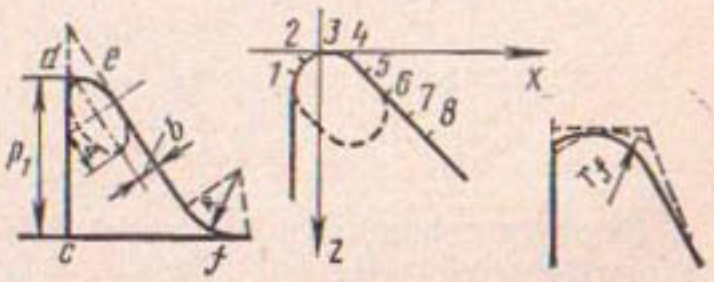


Рис. 5.17. Оголовки вакуумных водосливов

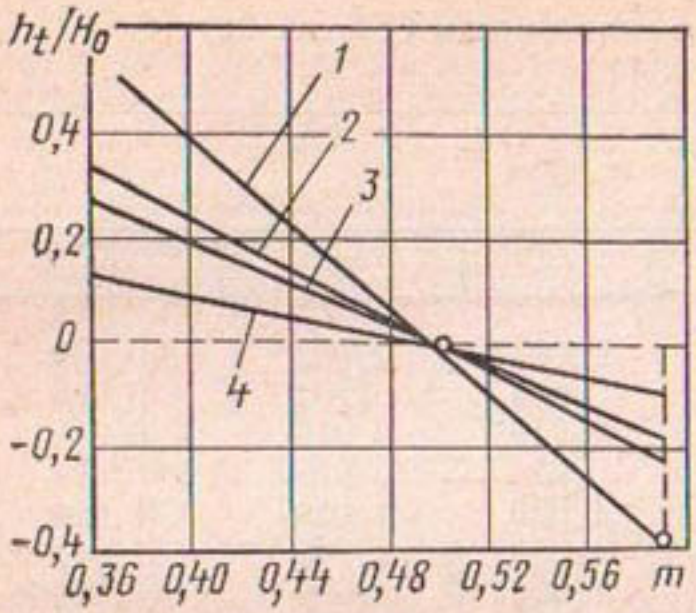


Рис. 5.18. Зависимость относительной глубины h_t/H_0 потока в НБ от коэффициента расхода m водослива при плоском затворе:
1 — a/H_0=0,7; *2* — 0,5; *3* — 0,4; *4* — 0,3 (a — высота подъема затвора; H_0 — напор с учетом скорости потока воды)

Коэффициенты подтопления σ_n:

для безвакуумных водосливов практического профиля

σ_n	1	0,998	0,996	0,991	0,983	0,972	0,957	
h_n/H_0	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	
σ_n	0,947	0,933	0,9...0,8	0,76	0,7	0,59	0,41	0,0
h_n/H_0	0,65	0,7	0,75	0,8	0,85	0,9	0,95	1,0

для вакуумных водосливов практического профиля

σ_n	1,0	0,999	0,99	0,971	0,94	0,895	0,845	0,788	0,723
h_n/H_0	—0,15	—0,1	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6

σ_n	0,642	0,538	0,39	0,0
h_n/H_0	0,7	0,8	0,9	1,0

Пропускную способность регулируемых водосливов определяют по таблице 5.18. Зависимость относительной глубины воды в НБ от расхода водослива при различном открытии затвора приведена на рисунке 5.18.

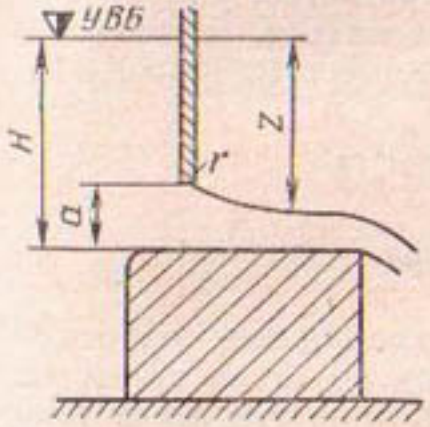
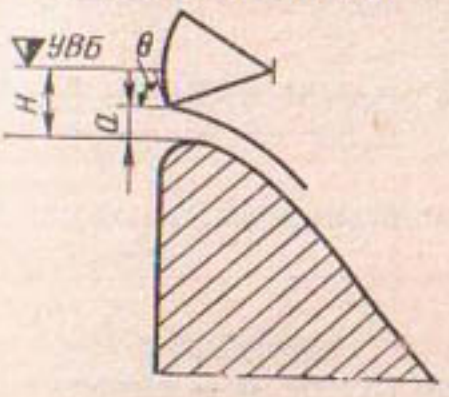
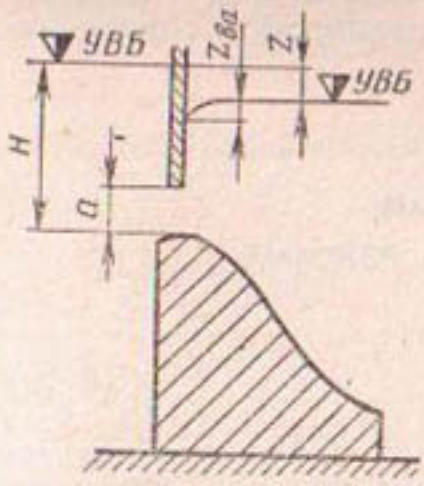
5.17. Коэффициенты расхода m вакуумных водосливов в зависимости от соотношения a/b

H_0/r_f	a/b			H_0/r_f	a/b		
	1	2	3		1	2	3
1,0	0,486	0,487	0,495	2,4	0,538	0,554	0,557
1,2	0,497	0,500	0,509	2,6	0,543	0,560	0,562
1,4	0,506	0,512	0,520	2,8	0,549	0,565	0,566
1,6	0,513	0,521	0,530	3,0	0,553	9,569	0,570
1,8	0,521	0,531	0,537	3,2	0,557	0,573	0,575
2,0	0,526	0,540	0,544	3,4	0,560	0,577	0,577
2,2	0,533	0,548	0,551				

5.3. ЗАКРЫТЫЕ ВОДОСБРОСНЫЕ СООРУЖЕНИЯ

Закрытые водосбросные сооружения имеют замкнутое сечение водовода. Закрытые трубчатые водосбросы, водоспуски и водовыпуски принято делить на участки (см. рис. 5.1). Особый участок таких водосбросов — затворные камеры (см. гл. 8). В качестве основных затворов обычно применяют плоские и сегментные, реже — конусные. Расстояние между основными и ремонтными затворами принимают равным 1,5...3 высотам водовода. Межзатворное прост-

5.18. Пропускная способность водосливов с затворами на гребне

Схема водослива	Расчетная зависимость	Коэффициенты
Свободное (неподтопленное) истечение из-под затвора плоский затвор 	$Q=\varphi\varepsilon ab\sqrt{2g[H_0-(\varepsilon a+h_t)/2]}$, где a — открытие затвора; b — пролет затвора; h_t — глубина за затвором, для водосливов с широким порогом $h_t=\varepsilon a$, для практического профиля без горизонтального участка на гребне $h_t=0$; для других очертаний поперечного профиля h_t определяют по графику (см. рис. 5.18)	φ — коэффициент скорости, равный 0,99; ε — коэффициент вертикального сжатия: $\varepsilon=[1+\sqrt{k(1-a^2/H^2)}]^{-1}$, где k — коэффициент, учитывающий условия обтекания верховой обшивки затвора: для плоского $k=0{,}4e^{-0{,}167\,r/a}$ (r — радиус закругления нижней грани затвора, $0\leqslant r/a\leqslant 0{,}25$);
сегментный затвор 	Та же формула, что и для плоского затвора	для сегментного $k=0{,}4\sin^3\theta$, где θ — угол наклона напорной обшивки у нижней кромки затвора
Несвободное (подтопленное) истечение из-под затвора 	$Q=\varphi\varepsilon ab\sqrt{2g(z+z_{bc})}$, где z_{bc} — перепад восстановления, $z_{bc}=h_n(1-A/2-\sqrt{A^2/4-AH_0/h_n+1})$; $A=4\varphi^2[1-\varepsilon ab/(h_nB_t)]\times\varepsilon ab/(h_nB_t)$, где z — перепад уровней воды до и после затвора; B_t — ширина НБ, $B_t=1{,}5\,h_n-0{,}5\,\varepsilon a$; h_n — глубина подтопления водослива	$\varphi\approx 0{,}95$; ε — то же, что и для свободного истечения

ранство, а также пространство перед аварийно-ремонтным затвором выполняют со стальной облицовкой дна, стен и потолка, что чаще всего бывает вызвано неблагоприятной кавитационной обстановкой в этой зоне.

Основные задачи гидравлических расчетов: определение размеров и назначение благоприятных очертаний отдельных частей водосбросов, обеспечивающих допускаемые гидродинамические нагрузки, приемлемую кавитационную обстановку на участках тракта и отсутствие опасных размывов русла. Для каждого из рассматриваемых вариантов конструкции водопропускного сооружения определяют пропускную способность для всех уровней и прогнозируют режимы течения потока при различных открытиях затворов и расходах; делают расчет аэрационных шахт, предусматриваемых для создания благоприятной кавитационной обстановки; определяют гидродинамические нагрузки на элементы конструкции сооружения при различных гидравлических режимах; дают расчетное обоснование концевых участков, условий сопряжения бьефов в их пределах и параметров воронок местных размывов.

5.3.1. ПРОПУСКНАЯ СПОСОБНОСТЬ ТРУБЧАТЫХ И ТУННЕЛЬНЫХ ВОДОСБРОСНЫХ СООРУЖЕНИЙ

В *безнапорном режиме* закрытые водосбросные сооружения работают при $H \leqslant 1{,}2...1{,}25\,h$. В этом случае расчет их выполняют по схеме истечения через водослив. Учет конкретной формы входного порога и очертаний продольного профиля позволяет выделить два возможных случая: истечение через водослив с широким порогом и истечение через водослив практического профиля (табл. 5.19).

ε для отверстий с острой кромкой водослива практического профиля с затопленным входом приведен ниже:

ε	0,617	0,620	0,622	0,625	0,628	0,633	0,638	0,645	0,650	0,660
h/H	0,10	0,20	0,25	0,30	0,35	0,40	0,45	0,50	0,55	0,60

Расход напорных трубчатых водосбросных сооружений рассчитывают по формуле

$$Q = \mu S \sqrt{2gH}, \tag{5.10}$$

где H — действующий напор, определяемый по формуле (5.12); μ — коэффициент расхода водосброса, отнесенный к площади расчетного поперечного сечения S,

$$\mu = [(S/S_t)^2 + \xi]^{-0,5}, \tag{5.11}$$

где S_t — площадь выходного сечения, принятого за расчетное; ξ — коэффициент сопротивления (потерь), определяемый по гидравлическим справочникам.

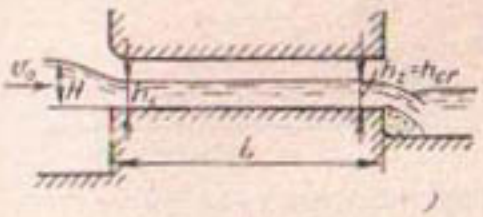
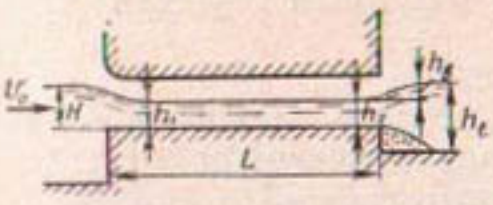
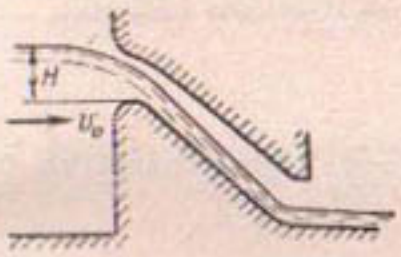
5.3.2. ДЕЙСТВУЮЩИЙ НАПОР ВОДОСБРОСНЫХ СООРУЖЕНИЙ, РАБОТАЮЩИХ В НАПОРНОМ РЕЖИМЕ

Действующий напор, входящий в формулу (5.10),

$$H = T_0 - \Pi, \tag{5.12}$$

где T_0 — полная удельная энергия потока относительно плоскости сравнения, проходящей через наинизшую точку выходного сечения водосбросного сооружения; Π — средняя удельная потенциальная энергия потока в выходном сечении относительно той же плоскости сравнения (рис. 5.19). Если определение T_0 не вызывает особых затруднений, то определение Π существенным образом зависит от схемы сопряжения концевого участка с НВ (табл. 5.20).

5.19. Пропускная способность закрытых водосбросных сооружений в безнапорном режиме

Схема истечения	Критические условия	Расчетные формулы
Водослив с широким порогом:		
неподтопленный 	$i<i_{cr}$; $i>i_{cr}$ $2...3H \leqslant L \leqslant (64-163m)H$ или приближенно $2...3H \leqslant L \leqslant 6...10H$; $i \simeq i_{cr}$ $2...3H \leqslant L \leqslant 1{,}3(64-163m)H$	$Q=\varepsilon m b \sqrt{2gH_0^{3/2}}$, где ε — коэффициент бокового сжатия, определяемый по формуле (5.10); m — коэффициент расхода (см. табл. 5.9 и 5.10), но увеличенный на каждую 0,01 уклона на 2% для прямоугольного сечения и на 1% для круглого; b — ширина отверстия; H_0 — напор в ВБ водослива с учетом скорости подхода
подтопленный 	$i<i_{cr}$ $L>(64-163\,m)H$ или сжатое сечение во входном оголовке подтоплено со стороны НБ	$Q=\varphi h_1 b \sqrt{2g\,(H_0-h_1)}$, где φ — коэффициент скорости потока, $\varphi=0{,}94...1$; h_1 — глубина потока на входе в водосброс, определяемая по кривой свободной поверхности в водосбросе
Водослив практического профиля:		
неподтопленный 	$H \leqslant 1{,}2...1{,}25\,h$	$Q=\varepsilon m b \sqrt{2g\,H_0^{3/2}}$, где ε находят по формуле (5.10), а m — по формуле (5.9)
с затопленным входом	$H>1{,}2...1{,}25\,h$	$Q=\varphi\varepsilon S \sqrt{2g(H_0-\varepsilon h)}$, где $\varphi=0{,}97$ при отсутствии пазов и 0,94 — при их наличии; ε — коэффициент сжатия потока, для отверстий с острой кромкой, см. стр. 236, а с округленной $\varepsilon = 1/\varphi\sqrt{C_p}$ (C_p — коэффициент максимального понижения давления); S, h — площадь и высота поперечного сечения потока на входе в водослив

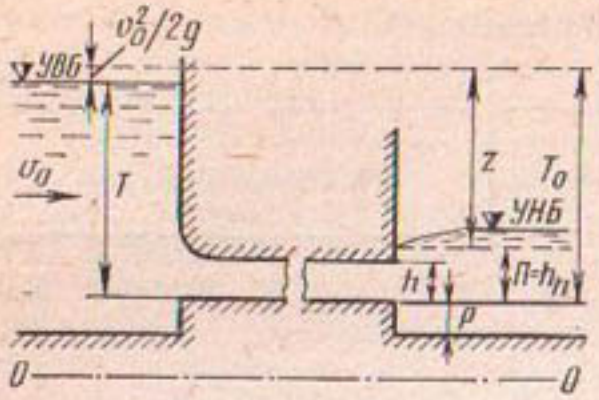


Рис. 5.19. Расчетная схема напорного водосбросного сооружения:

v_0 — скорость потока воды в ВБ; T, T_0 — полная удельная энергия потока на входе и выходе; h — глубина потока в водосбросе; $h_п$ — глубина подтопления водосброса; z — перепад уровней воды в ВБ и НБ; p — высота уступа

5.20. Средняя удельная потенциальная энергия потока при различных схемах сопряжения водосброса с НБ

Схема сопряжения	Расчетная формула
Сопряжение с НБ без уступа (при $p=0$):	
незатопленное выходное сечение	$П=h$
затопленное выходное сечение: $b/B>0{,}7$*, $b=B$, $i=0$	$П=h_п$ $h_п=\sqrt{h_t^2-(2q^2/g)\,[(h_t-h)/h_t h]}$, где q — удельный расход; h_t — глубина потока в НБ; $h_п$ — глубина за затопленным выходным сечением
Сопряжение с НБ уступом:	
незатопленное выходное сечение и донный режим сопряжения	$П=0{,}25(3h+h_0)$, где h_0 — избыточное давление под струей, при неограниченном подводе воздуха под струю $h_0=0$
незатопленное выходное сечение, сопряжение поверхностным прыжком	$П=0{,}5(h+h_0)$
затопленное выходное сечение, сопряжение любым прыжком (донным или поверхностным), $h_t>p+h$, $b/B<0{,}7$	$П=0{,}5(h+h_з+h_0)$, где $h_з$ — пьезометрическое давление над потолком выходного сечения

* При $b/B<0{,}7$ для затопленного выходного отверстия П определяют расчетом сопряжения бьефов.

5.3.3. РАСЧЕТ ВХОДНЫХ ОГОЛОВКОВ

Заглубление входных оголовков под уровни ВБ определяется назначением и компоновкой гидроузла, режимом работы его водопропускных сооружений в период строительства и эксплуатации, конструктивных особенностей сооружений и их основных частей. Уменьшение заглубления облегчает условия эксплуатации гидромеханического оборудования, но одновременно ведет к возрастанию опасности захвата воздуха и воронкообразования. Минимальное заглубление, при котором отсутствуют вихревые воронки, при фронтальном в плане симметричном подводе воды $\delta_{min}=052\,v\sqrt{h}$; при косом подводе воды $\delta_{min}=0{,}7\,v\sqrt{h}$, где v и h — соответственно средняя скорость (м/с) и высота сечения водовода (м) за входным оголовком.

Очертания входного оголовка должны обеспечить следующие условия: коэффициент сопротивления оголовка наименьший; очертания поверхностей, контактирующих с водой, удобообтекаемые и простые с точки зрения технологии их изготовления, пространственные размеры оголовка обжатые, во всех

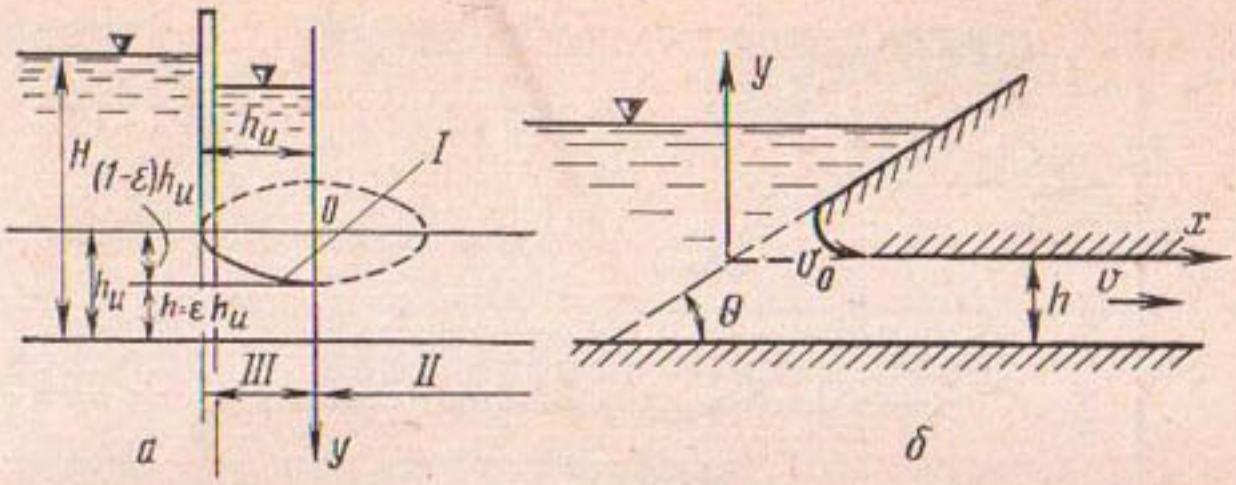


Рис. 5.20. К построению эллиптического оголовка закрытых водопропускных сооружений:

а — очертание эллиптического оголовка; *б* — расчетная схема к определению координат оголовка; H — напор; h_u — глубина на входе закрытого водовода; ε — коэффициент сжатия струи; h — высота водовода; θ — угол наклона напорной грани к горизонтали; v_0 — скорость на криволинейной входной стенке; v — скорость в закрытом водоводе постоянного сечения; *I* — граничная линия; *II* — участок расширения; *III* — участок сжатия

частях оголовка благоприятная кавитационная обстановка. Последнее условие является определяющим.

Существует две основных группы способов построения очертаний входных оголовков. Первая — по дуге «опорного» круга или эллипса (рис. 5.20, *а*), уравнение которого имеет вид

$$\frac{x^2}{h_u^2} + \frac{y^2}{(1-\varepsilon)^2 h_u^2} = 1, \qquad (5.13)$$

где ε — коэффициент сжатия струи, $\varepsilon = 0{,}57 + 0{,}043/(1{,}1 - h_u/H)$ (h_u — глубина воды в водоводе на входе).

Вторая — по теоретическим координатам границ струи, вытекающей из отверстия в тонкой стенке (табл. 5.21, рис. 5.20, *б*), получаемые этим методом оголовки компактнее эллиптических, а их вакуумные характеристики заданы наперед. Относительное снижение пьезометрического давления постоянно по всей криволинейной части оголовка.

5.4. РЕЗЕРВНЫЕ ВОДОСБРОСЫ

Резервные водосбросы применяют в компоновках речных гидроузлов для снижения общей стоимости водосбросных сооружений. Крупные гидроузлы с глухими плотинами из грунтовых материалов обычно имеют водосбросы большой пропускной способности. Стоимость их высока, однако весьма вероятно, что за весь период существования гидроузла водосброс ни разу не будет работать на полную мощность. В связи с этим обычно предусматривают несколько водосбросов: один (реже несколько) основной бетонный, рассчитанный на пропуск паводков частой повторяемости, и один или два резервных (вспомогательных), рассчитанных на пропуск паводков редкой повторяемости. Резервные водосбросы стремятся строить простыми и дешевыми. Если есть возможность, для этой цели используют пойму, местные понижения рельефа или береговые каналы.

При расположении резервного водосброса в русле или в спрямляющем излучину канале его устраивают по типу низкопороговой водосливной плотины с широким порогом и поверхностными водосливными отверстиями, перекрываемыми плоскими затворами. Основные схемы компоновки гидроузлов с различными типами резервных водосбросов приведены на рисунке 5.21. Гидравлический расчет гидроузлов с резервными пойменными водосбросами заключается в определении расходов поймы — водосброса или бетонного водосброса, обеспечивающих необходимые глубины воды в русле; требуемое наполнение НБ к моменту выхода паводковых вод на пойму (пойменный во-

5.21. Координаты входных оголовков для различных v_0/v и углов наклона напорной грани 0

v_0/v	x/h	y/h	v_0/v	x/h	y/h	v_0/v	x/h	y/h
	$\theta \approx 60°$			$\theta \approx 90°$			$\theta \approx 120°$	
1,069	1,1119	—0,6617	1,105	1,1600	—0,4916	1,0339	1,3767	—0,3873
	0,5625	—0,5532		0,5041	—0,3840		0,7997	—0,3308
	0,3007	—0,4394		0,3196	—0,3146		0,5103	—0,2707
	0,1512	—0,3330		0,2180	—0,2597		0,3301	—0,2128
	0,0657	—0,2381		0,1508	—0,2130		0,2086	—0,1591
	0,0382	—0,1959		0,1091	—0,1716		0,1628	—0,1343
	0,0186	—0,1576		0,0728	—0,1340		0,1248	—0,111
	—0,0027	—0,0932		0,0454	—0,0993		0,0679	—0,0700
	—0,0080	—0,0460		0,0520	—0,0669		0,0312	—0,0371
	—0,0051	—0,0158		0,0102	—0,0365		0,0101	—0,0139
	0	0		0	0		0	0
1,1431	0,8745	—0,5785	1,173	0,8441	—0,4204	1,0692	1,1484	—0,3532
	0,4989	—0,5012		0,4280	—0,3435		0,7399	—0,3106
	0,2734	—0,4028		0,2790	—0,2832		0,4821	—0,2569
	0,1396	—0,3069		0,1930	—0,2338		0,3141	—0,2029
	0,0605	—0,2201		0,1232	—0,1909		0,1993	—0,1521
	0 0352	—0,1813		0,0900	—0,1525		0,1557	—0,1285
	0,0050	—0,1142		0,0594	—0,1176		0,1195	—0,1063
	—0,0025	—0,0846		0,0355	—0,0851		0,0651	—0,0671
	—0,0074	—0,0426		0,0182	—0,0548		0,0300	—0,0356
	—0,0046	—0,0146		0,0064	—0,0262		0,0097	—0,0133
	0	0		0	0		0	0
1,5109	0,3256	—0,3077	1,244	0,6500	—0,3587	1,2292	0,5503	—0,2213
	0,2479	—0,2903		0,3680	—0,3055		0,4529	—0,2105
	0,1576	—0,2502		0,2480	—0,2556		0,3340	—0,1853
	0,0967	—0,1990		0,1710	—0,2113		0,2316	—0,1522
	0,0391	—0,1466		0,1333	—0,1745		0,1890	—0,1345
	0,0231	—0,1219		0,0836	—0,1395		0,1201	—0,0961
	0,0113	—0,0989		0,0544	—0,1085		0,0930	—0,0830
	—0,0018	—0,0593		0,0330	—0,0789		0,0513	—0,0529
	—0,0052	—0,0295		0,0167	—0,0511		0,0238	—0,0283
	—0,0033	—0,0102		0,0041	—0,0247		0,0077	—0,0106
	0	0		0	0		0	0

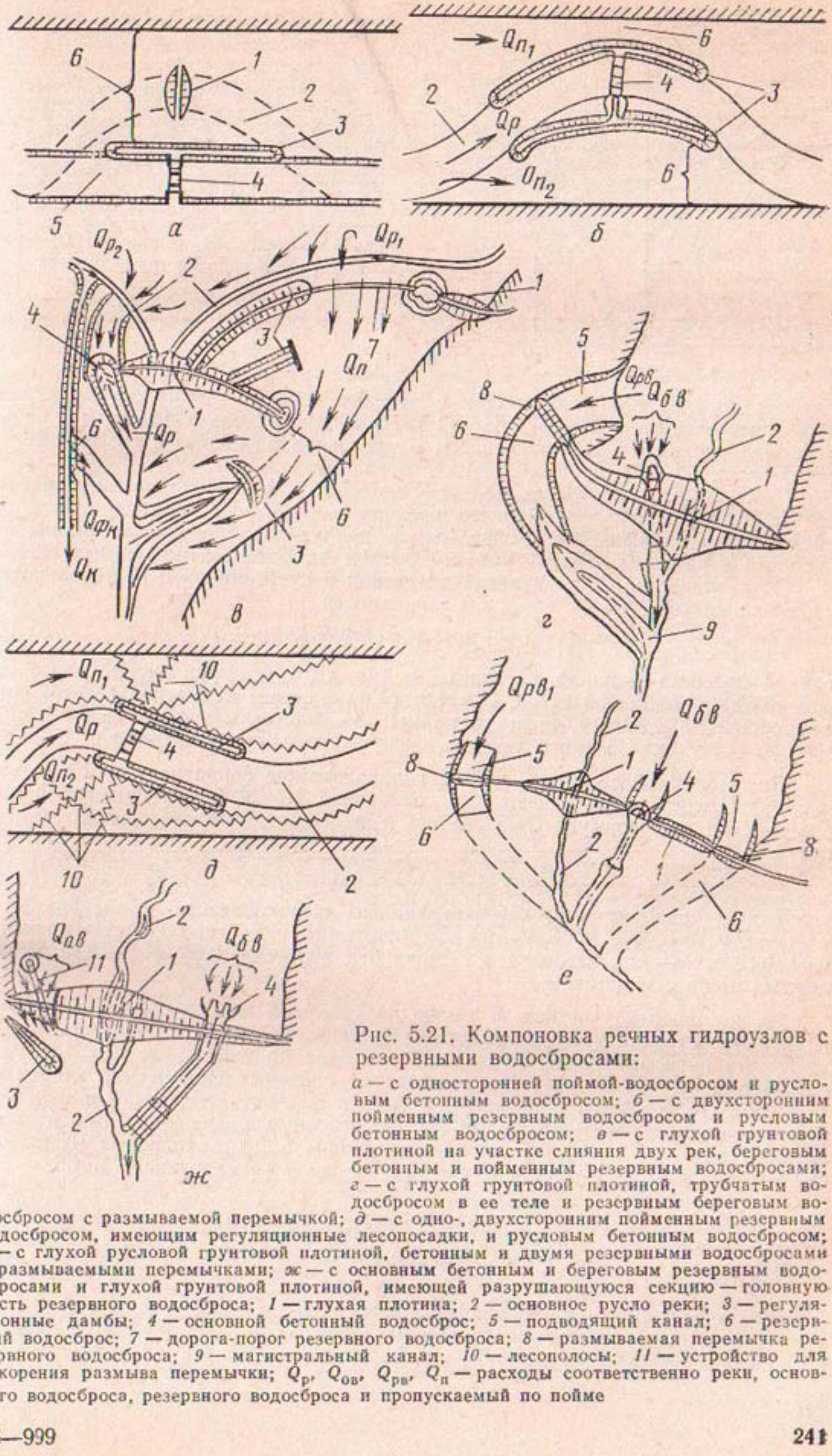


Рис. 5.21. Компоновка речных гидроузлов с резервными водосбросами:

а — с односторонней поймой-водосбросом и русловым бетонным водосбросом; *б* — с двухсторонним пойменным резервным водосбросом и русловым бетонным водосбросом; *в* — с глухой грунтовой плотиной на участке слияния двух рек, береговым бетонным и пойменным резервным водосбросами; *г* — с глухой грунтовой плотиной, трубчатым водосбросом в ее теле и резервным береговым водосбросом с размываемой перемычкой; *д* — с одно-, двухсторонним пойменным резервным водосбросом, имеющим регуляционные лесопосадки, и русловым бетонным водосбросом; *е* — с глухой русловой грунтовой плотиной, бетонным и двумя резервными водосбросами с размываемыми перемычками; *ж* — с основным бетонным и береговым резервным водосбросами и глухой грунтовой плотиной, имеющей разрушающуюся секцию — головную часть резервного водосброса; *1* — глухая плотина; *2* — основное русло реки; *3* — регуляционные дамбы; *4* — основной бетонный водосброс; *5* — подводящий канал; *6* — резервный водосброс; *7* — дорога-порог резервного водосброса; *8* — размываемая перемычка резервного водосброса; *9* — магистральный канал; *10* — лесополосы; *11* — устройство для ускорения размыва перемычки; $Q_р$, $Q_{ов}$, $Q_{рв}$, $Q_п$ — расходы соответственно реки, основного водосброса, резервного водосброса и пропускаемый по пойме

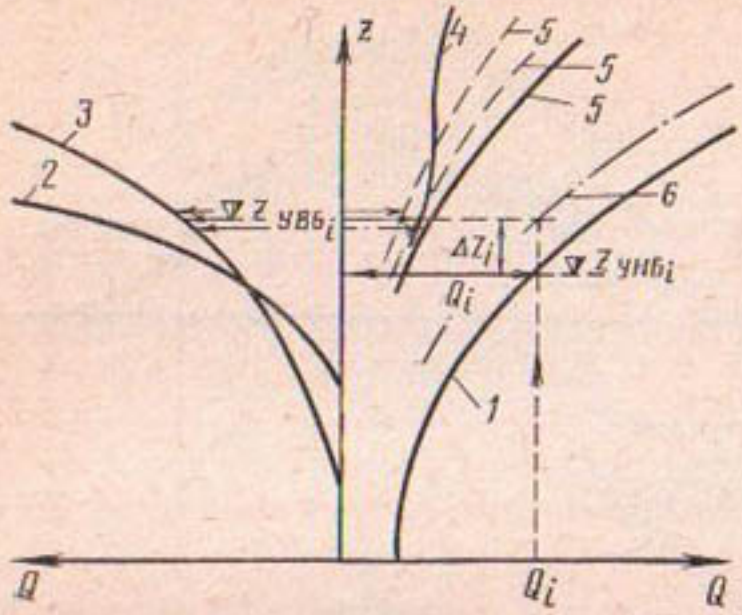


Рис. 5.22. Схема к расчету пропускной способности гидроузла с резервным пойменным водосбросом:

1 — кривая расходов реки при естественном состоянии русла (НБ гидроузла); *2, 3* — кривая расходов для отдельных сжатых сечений пойменного водосброса; *4* — кривая пропускной способности бетонного водосброса с учетом подтопления; *5* — семейство расчетных кривых пропускной способности русловой бетонной плотины при различных значениях перепада Δz; *6* — кривая расходов ВБ гидроузла; Q_i — расчетный расход водосбросов гидроузла

досброс), чтобы пропуск паводка с использованием поймы осуществлялся без существенного перепада уровней бьефов; исключение размывов на пойме и в зоне слияния в НБ пойменного и руслового расходов, а также обхода рекой бетонных и грунтовых сооружений гидроузла.

Пропускную способность поймы — водосброса в предварительных расчетах принимают как долю общего расхода морфоствора, приходящуюся на пойму. Схема графического определения пропускной способности поймы-водосброса и разницы отметок уровней бьефов Δz показана на рисунке 5.22.

Гидравлические сопротивления древесной и кустарниковой растительности на пойме можно учесть с помощью зависимости

$$v^2 = 2giS/[C_x\,(Nd)\,S_x], \qquad (5.14)$$

где v — средняя скорость потока на пойме; C_x — коэффициент лобового сопротивления одиночной ветви, $C_x \simeq 1{,}2$; (Nd) — сумма диаметров ветвей, приходящихся на единицу площади поймы; S — площадь живого сечения поймы; S_x — площадь живого сечения, заполненная решеткой ветвей.

При малой облесенности поймы гидравлическое сопротивление от ветвей и стволов деревьев учитывают как добавочное. Коэффициент суммарной шероховатости $\bar{n}$ в формуле $C = (1/\bar{n})\,h^{1/6}$ в этом случае определяют по зависимости

$$\bar{n} = \sqrt{n^2 + [C_x\,(Nd)\,S_x/(2gS)]\,h^{4/3}}, \qquad (5.15)$$

где h и n — глубина потока и коэффициент шероховатости поймы без леса; $(Nd) \approx 0{,}1$ м$^{-1}$ для прибрежных и пойменных кустарниковых ивняков, 0,02...0,03 м$^{-1}$ — для затопляемых лесов без подлеска, 0,05 м$^{-1}$ — для затопляемых лесов с подлеском.

На пойменных участках, а также на границах между руслом и поймой размещают струенаправляющие дамбы и искусственные лесополосы, чтобы увеличить пути движения паводковых расходов по пойме, максимально удалив возможные очаги местного размыва от основных сооружений гидроузла (бетонного водосброса, водозабора и др.) и подавить тенденции к накоплению деформаций поверхности поймы на основных размывоопасных направлениях, создать с помощью лесополос подпоры в местах опасных размывов, снизить продольные скорости движения потока у регулирующих дамб.

5.5. НБ ВОДОСБРОСНЫХ СООРУЖЕНИЙ

При проектировании НБ решают целый ряд взаимосвязанных задач: расчет параметров гидравлического режима потока на участке сопряжения; обоснование размеров частей НБ; прогноз параметров взаимодействия потока

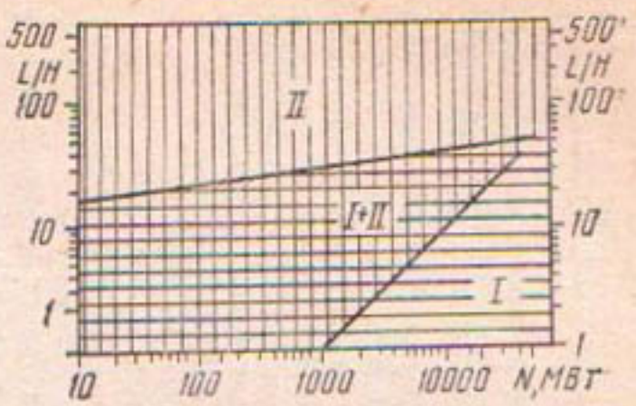


Рис. 5.23. Область преимущественного применения различных форм сопряжения бьефов:

I — гашение отбросом струи в колодце; *II* — гашение в колодце одной из форм гидравлического прыжка; *L/H* — относительная ширина речной долины; *N* — мощность сбрасываемого потока, $N=0{,}0098\,Qz$; (*Q* — расчетный расход водосброса, м³/с; *z* — перепад уровней бьефов при расчетном паводке, м)

с отдельными частями НБ для последующей оценки их устойчивости и прочности; прогноз общих и местных переформирований речного дна ниже сооружения по течению воды.

Режим сопряжения бьефов определяется двумя основными факторами: сужением водосливного фронта плотин по сравнению с руслом реки и значительной избыточной кинетической энергией сбрасываемого потока вследствие перепада уровней в бьефах.

Основные схемы гашения избыточной энергии потока и соответствующие им режимы сопряжения бьефов приведены в таблице 5.22. Схема оптимальных режимов сопряжения бьефов по данным обобщения опыта строительства гидроузлов приведена на рисунке 5.23, а рекомендуемые схемы сопряжения в зависимости от высоты плотины и относительной ширины створа *l/h* (*l* и *h* — длина и высота плотины) в таблице 5.23.

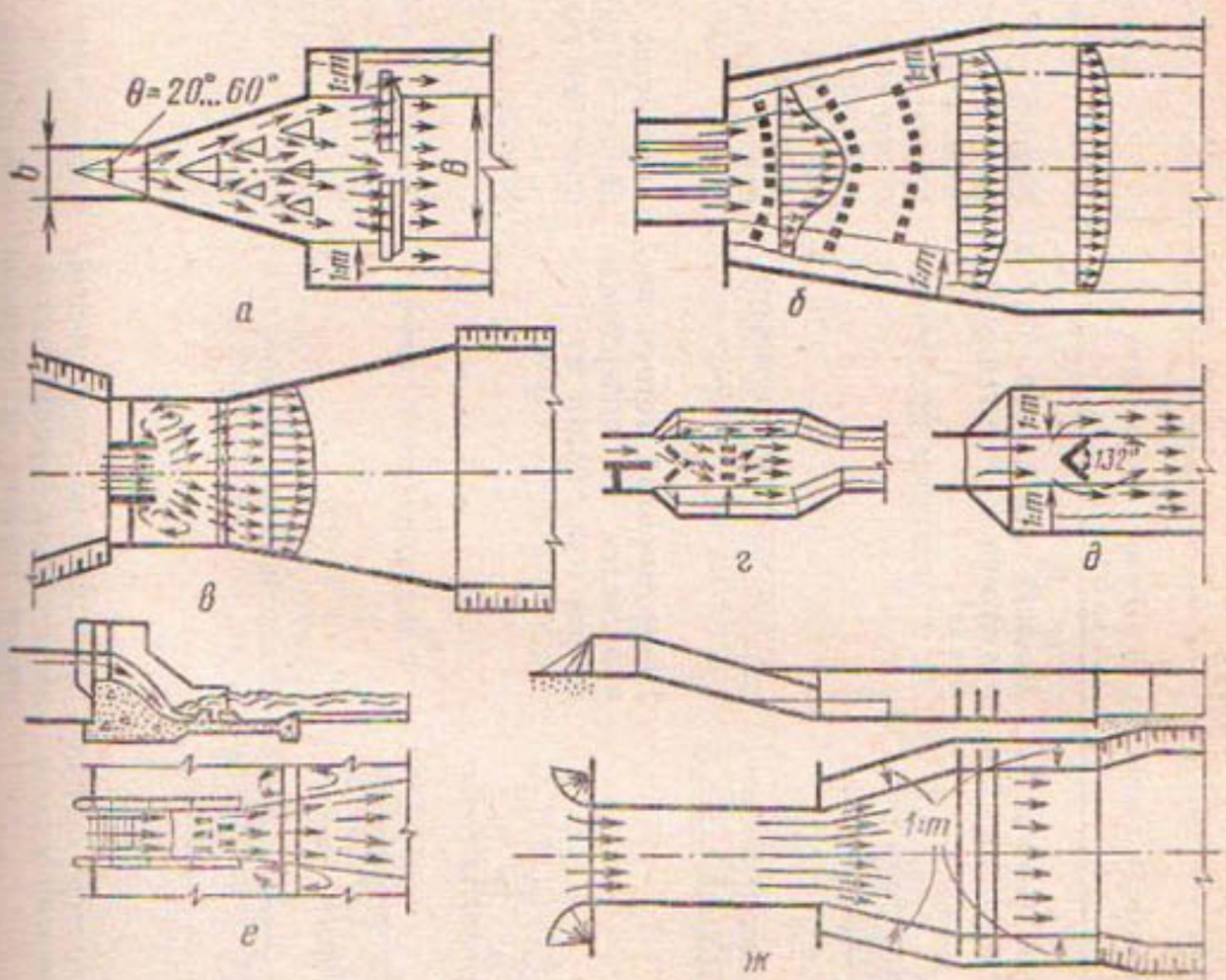
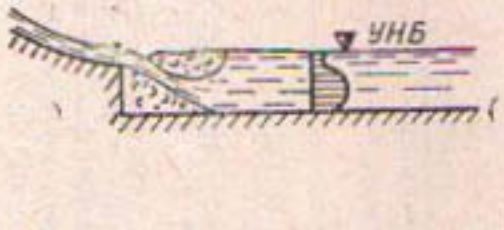
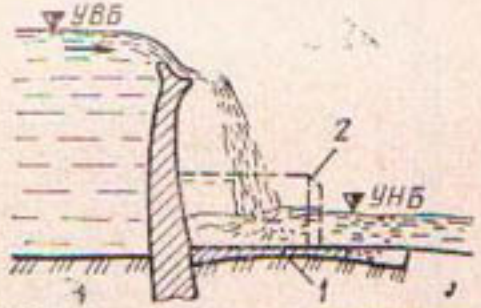
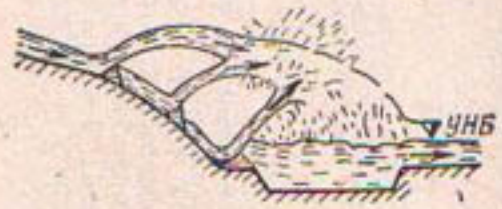


Рис. 5.24. Конструктивные мероприятия по борьбе со сбойностью в НБ:

а — гасители-расщепители в комбинации с водобойной стенкой; *б* — три ряда шашечных гасителей; *в* — водобойная стенка в конце водобоя и расширяющаяся рисберма; *г* — комбинация растекателей с шашечными гасителями; *д* — порог-растекатель; *е* — комбинация удлиненных быков с двумя рядами шашечных гасителей; *ж* — комбинация направляющих стенок с тремя рядами порогов искусственной шероховатости

5.22. Режимы сопряжения бьефов

Схема гашения энергии потока	Режим сопряжения	Способ реализации	Условия и особенности использования
Гидравлический прыжок 	Донный (транзитная струя устойчиво находится у дна русла): с отогнанным прыжком с затопленным прыжком	Устройство уступа при гладком водобое (с подводом воздуха к низовой грани при неблагоприятной кавитационной обстановке); специальные устройства на водобое для гашения избыточной энергии сбрасываемого потока (гасители, камеры гашения и др.)	В водосбросах всех типов при любых напорах Значительные медленно затухающие по длине донные скорости и вращение в вальце плавающих тел, которые могут повредить поверхность сооружения
 	Поверхностный (струя располагается на поверхности потока или вблизи нее): с затопленной струей с незатопленной струей	Устройство носка-уступа с горизонтальной или наклонной поверхностью	Рационален при незначительном заглублении крепления и подошвы плотины. Облегчается крепление и сброс льда. Требует больших глубин НБ. Неустойчивость границ надежного существования его форм, неизбежность значительных колебаний уровня НБ (раскачка бьефа)
	Поверхностно-донный		
Свободное падение струи с гашением энергии в водяной толще	Часть энергии струи рассеивается из-за аэрации, оставшаяся гасится в водяной подушке	Сброс струи с носка-трамплина на водобой (*1*) или в замкнутый водоем (*2*), образованный стенкой	Применяют редко, преимущественно в водосбросах арочных плотин. Требует особенно прочного основания. При необходимости защи-

 Отброс струи с гашением энергии в воронке размыва	Один из видов поверхностного режима при подъеме уровня НБ до отметок носка-трамплина	Отброс струи с носка-трамплина в естественное русло с образованием ямы размыва в предварительно устроенную яму размыва (с креплением ее поверхности или без него) или в водобойный колодец. Отброс струи из глубинных отверстий	Широко распространен при достаточно прочных основаниях. Устойчивый и гидравлически ясный режим сопряжения. Неупорядоченный характер течения в НБ в начальный период эксплуатации; необходимо предварительное устройство ямы размыва; неравномерность удельных расходов по ширине НБ; сложность компоновки гидроузла в стесненных створах; опасность нарушения устойчивости склонов из-за глубокой воронки размыва
Соударение струй в водяной или воздушной среде 	Интенсивное гашение энергий в воздухе или в воде	Отброс струй из глубинных отверстий или с носков-трамплинов на разных уровнях	Облегчает условия сопряжения для предыдущего случая, сокращает воронку размыва
Комбинирование двух или нескольких схем (рис. 28, *е*)	Донный затопленный прыжок в колодце и отброс струи на значительное расстояние, где гасится в яме размыва	Ковш-колодец с концевым порогом-трамплином	Сброс расходов частой повторяемости по типу донного затопленного прыжка в колодце; при сбросе расходов редкой повторяемости поток с большой скоростью проскакивает колодец и отбрасывается его концевым порогом

5.23. Рекомендуемые сопряжения бьефов

Относительная ширина створа	Высота плотины, м	Схема сопряжения бьефов
$l/h>3$	До 40	Донный гидравлический прыжок. Незатопленный поверхностный прыжок
	Более 40	Отброс струи носками-трамплинами
$l/h\leqslant 3$	Любая	Донный гидравлический прыжок

Движение сбрасываемого потока в НБ, как правило, сопровождается его резким расширением в плане с отрывом потока от стенок сооружения и возникновением водоворотных зон. Это приводит к разделению потока на транзитную часть, в которой перемещается основная масса воды, и нетранзитную — водовороты. Границы транзитной части и параметры водоворотов устанавливают специальным гидравлическим расчетом. Движение транзитной части возможно в двух формах: плавнорасширяющийся в плане поток определенного режима; сбойное течение, характеризующееся резким изменением направления потока после выхода его из сооружения в широкий НБ ($b/B\leqslant 0{,}8$) или сжатием потока, вызываемым боковым натеканием воды из окружающих водоворотов. Конструктивные схемы борьбы со сбойным течением приведены на рисунке 5.24.

5.5.1. ОСНОВНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ КРЕПЛЕНИЯ ПРИ ДОННОМ РЕЖИМЕ СОПРЯЖЕНИЯ

Крепление НБ — это совокупность сооружений для обеспечения безопасного и надежного отвода сбрасываемого потока в русло реки. Элементы крепления и их характеристики приведены в таблице 5.24, а основные схемы — на рисунке 5.25. Для качественного и количественного преобразования режима и параметров движения потока на участке сопряжения бьефов применяют специальные конструкции (табл. 5.25). Основные из них — гасители. Различают три основных вида воздействия гасителей на поток: *реактивное* — динамическое воздействие горизонтальных составляющих реакции гасителей, направление навстречу потоку; *диссипирующее* — разделение потока на большое число струй для интенсификации процесса диссипации его энергии; *распределительное* — переформирование кинематической структуры потока путем подтормаживания придонных слоев потока и отклонения их к поверхности.

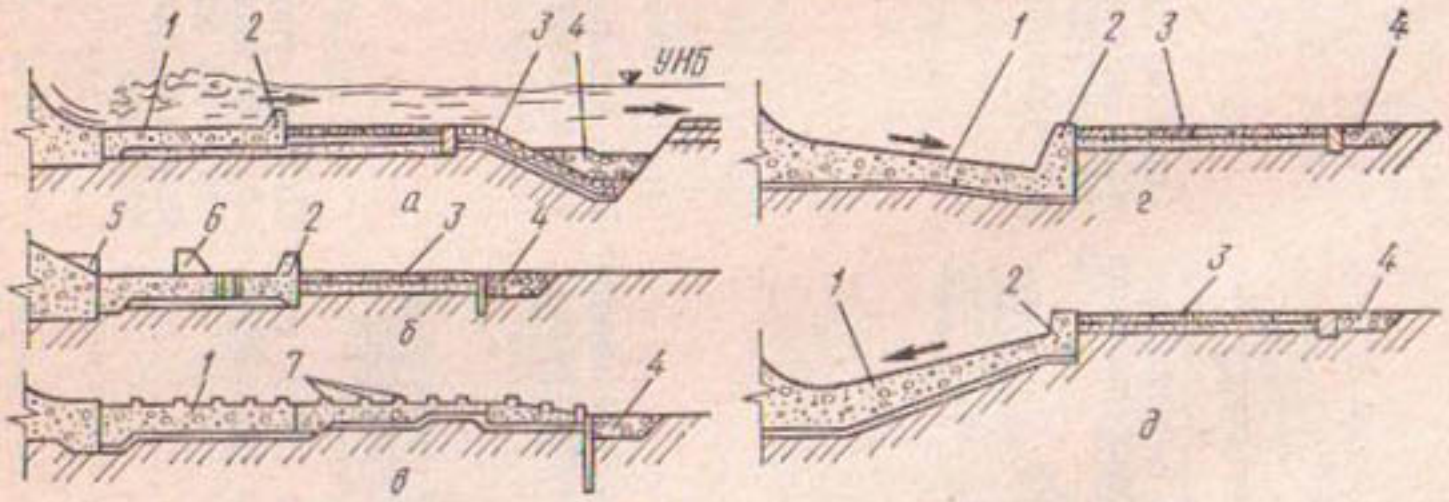


Рис. 5.25. Схемы крепления НБ при донном режиме сопряжения:

а — гладкий водобой с порогом по типу водобойной стенки; *б* — водобой с гасителями, расщепителями и концевым порогом; *в* — водобой и рисберма с положительным наклоном; *г* — наклонный водобой с положительным наклоном; *д* — наклонный водобой с отрицательным наклоном; *1* — водобойная плита; *2* — порог; *3* — рисберма; *4* — концевая часть; *5* — расщепитель; *6* — гаситель; *7* — ребра искусственной шероховатости

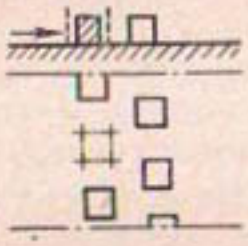
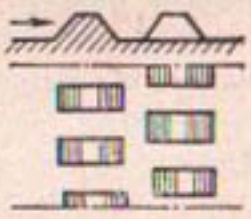
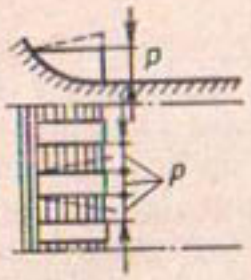
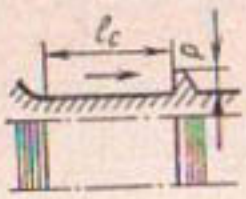
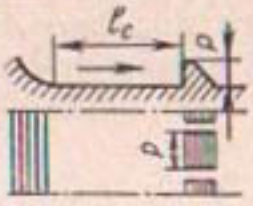
5.24. Элементы крепления НБ

Элементы	Назначение и размеры	Особенности конструкции
Водобой	Прочное массивное крепление в зоне гидравлического прыжка. Для затопления прыжка плиту заглубляют в грунт основания, или снабжают гасителями, расщепителями и концевыми порогами, или делают наклонной (при прямом наклоне уклон 0,25...0,08; при обратном — 0,04)	Массивная бетонная плита из особо прочных бетонов, сталебетонов и пластбетонов с надежными уплотнениями в швах. В конце ее небольшой зуб для предупреждения последствий от осадки рисбермы. Под плитой — дренаж с обратным фильтром. Дренажные колодцы из пористого бетона или полые с фильтровой набивкой для отвода дренажных вод и снятия дефицита давления
	Длина водобойной плиты: без гасителей $l=1...1{,}25\,l_n=14...15\,h_{cr}$; с гасителями $l=0{,}8\,l_n=7...10\,h_2$, где l_n — длина затопленного гидравлического прыжка, $l_n=6(h_t-h_1)\approx 6{,}9(h_2-h_1)$; h_1, h_2 — сопряженные глубины	Арматуру плиты подбирают по эпюрам моментов в вертикальных сечениях. Разрезка швами — поперек потока, обычно равна длине секций плотины
Рисберма	Защита дна от размыва на участке завершения гашения избыточной энергии потока: 30..40% энергии сбрасываемого потока. Общую длину крепления НБ (водобой плюс рисберма) вычисляют по зависимости $l=9(h_2-h_1)=6(h_2-h_1)+8h_{cr}$	Гибкость крепления и свободный выход фильтрационного потока из-под водобоя. По слою обратного фильтра укладывают бетонные и железобетонные плиты (сборные и монолитные); каменная наброска и кладка, габионы, ряжи, заполненные камнем. В плитах устраивают дренажные колодцы (0,25×0,25...1×1 м) на расстоянии 5...10 м друг от друга
Концевая часть	Защита от размыва участка выхода с рисбермы. Дно ковша закладывают на отметке ожидаемого размыва. Слой камня — до 4 м	Обычно ковш с камнем, зуб, свайный ряд или каменная отсыпка. Для сопряжения донным прыжком — ковш с камнем, верховой откос 1 : 4...1 : 5, низовой в процессе эксплуатации размывается. Верховой откос и его подошву покрывают гибким креплением из бетонных плит на щебеночной подсыпке

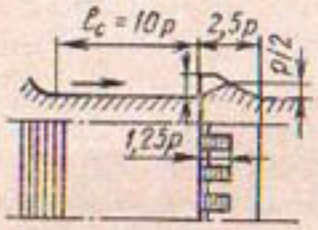
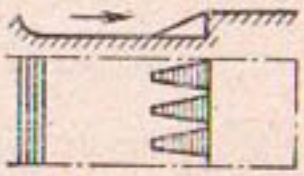
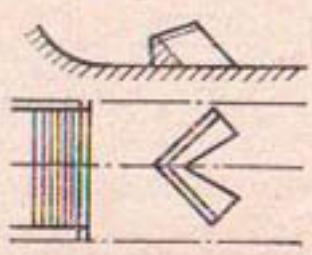
Реактивное воздействие гасителей управляет сопряженными глубинами потока, диссипирующее — стабилизирует положение гидравлического прыжка (разрезные гасители эффективнее сплошных), распределительное — переводит донный режим в более благоприятный поверхностный.

ВНИИГиМ предложен водобой с гасителями, конструкция которых обеспечивает вертикальное и горизонтальное расслоение потока с последую-

5.25. Элементы крепления НБ для улучшения условий гашения избыточной энергии

Тип и схема конструкций	Назначение
Гасители: шашки 	Качественное и количественное преобразование режима и параметров потока. Обеспечивают уменьшение длины водобоя. Устанавливают в шахматном порядке. Первый ряд на расстоянии $(1...1{,}5)h_1$ от сжатого сечения потока. Высота гасителей $(0{,}75...2{,}5)h_1 \approx (0{,}5...0{,}7)h_{cr}$. Ширина примерно равна высоте
пирсы 	
Расщепители: $p=1...1{,}35\,h_1$ 	Улучшают работу гасителей, уменьшают удельный расход струи при падении, увеличивают эффективную глубину потока при выходе на водобой. Устанавливают параллельно потоку симметрично относительно оси; при сходящихся или расходящихся стенках — веерообразно
Концевые пороги: водобойная стенка сплошная $p=1{,}2\,h_{cr}\sqrt{8T_0/h_{cr}+2}$ 	Отклонение струй за водобоем и образование длинных плоских вальцов, взаимодействующих с транзитным потоком; предохраняют незащищенное дно за рисбермой от размыва за счет уменьшения донных скоростей; помогают более равномерному распределению расходов по ширине рисбермы
прорезная 	

Продолжение

Тип и схема конструкций	Назначение
зубчатый порог Т. Ребока, $p=0{,}15...0{,}2\,q\sqrt{z}$  (зигзагообразный и криволинейный пороги) порог с клиновидными прорезями 	
Растекатели 	Удлиненные в плане гасители под углом к направлению потока обеспечивают равномерное распределение потока по ширине водобоя; изменение направления потока

Примечание. l_c — длина стенки; h_1, h_{cr} — глубина водного потока, сопряженная и критическая; T_0 — удельная энергия сечения потока; q — удельный расход через порог; z — разность отметок входного порога и дна водобоя.

щим соударением струй в колодце, образованном вторым порогом (рис. 5.26). Рекомендуемые размеры элементов верхового порога: высоту ступеней и открылка определяют по графику (рис. 5.26, *в*); ширина ступеней одинакова (для малых чисел Фруда в сжатом сечении Fr_c ширина открылка может быть увеличена на 20...25%); расстояние до первого порога от сжатого сечения l_1 устанавливают с таким расчетом, чтобы напорная грань открылка у боковой стенки водобоя находилась в сжатом сечении (или достаточно близко к нему); угол поворота открылка в плане 10...25°, большее значение соответствует меньшему Fr_c; наклон сливной грани для всех ступеней не менее 1 : 2,5.

Расстояние между первым и вторым порогом для удельных расходов в начале водобоя 10...20 м³/с и числах $Fr_t=0{,}2...0{,}35$ можно принимать 20...35 м (бóльшее соответствует бóльшим удельным расходам и бóльшим значениям Fr_t). Для низового порога высоту центральной части открылка находят по графику (рис. 5.26, *г*), ширина $b_щ=1...2\,b_0$; $\beta=8...15°$; $\gamma=15...20°$ (большее значение соответствует меньшему значению Fr_t). Коэффициент разрезки зубьев второго гасителя $k_р=b_{зуб}/b_щ=1$; ширина зуба 0,8...1,2 м. Расстояние от низовой кромки второго порога до конца водобоя не менее 10...15 м. Общая длина водобоя для подобных сооружений 35...50 м.

Для повышения надежности работы сооружения в НБ за водобоем возможно устройство дополнительного ковшового гасителя глубиной 1,5...3 м,

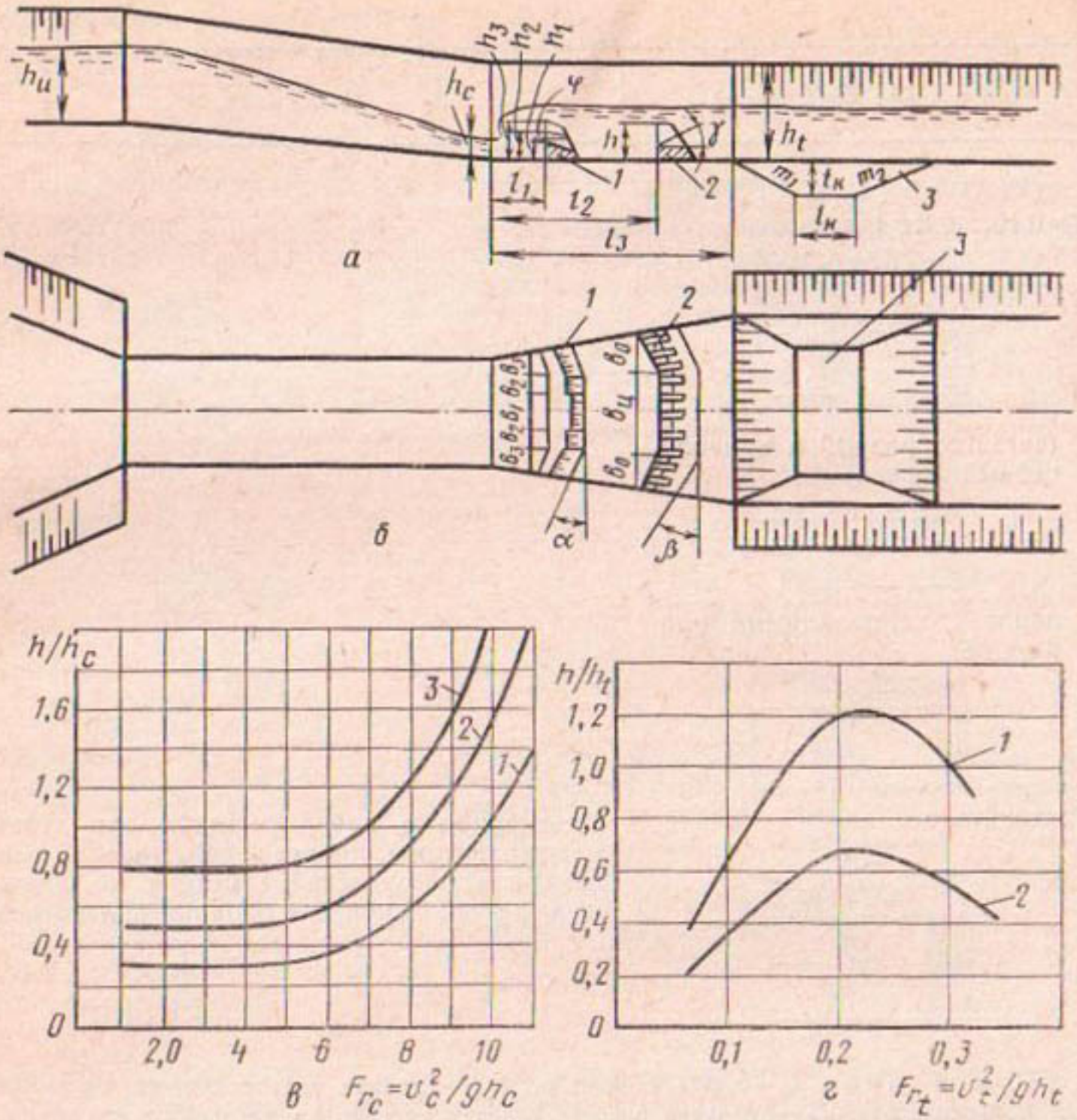


Рис. 5.26. Гаситель энергии потока (ВНИИГиМ):

а — поперечное сечение гасителей; *б* — план; *1* — верховой ступенчатый порог; *2* — низовой прорезной порог; *3* — ковш; *в* — зависимости относительной высоты верхового порога от числа Фруда для сжатого сечения; *1, 2, 3* — для высоты соответственно первой h_1, второй h_2 ступеней и открылка h_3; *г* — график зависимости относительной высоты низового порога от числа Фруда для выходного сечения на рисберму; *1* — полной высоты гасителя h; *2* — для высоты непрорезной части гасителя $h_ц$; $h_н$ — глубина воды на входе в сооружение; h_c — глубина воды в сжатом сечении; h_t — глубина в НБ; b_1, b_2, b_3 — ширина соответственно первой, второй ступеней и открылка верхового порога; l_1, l_2 — расстояние от сжатого сечения до напорной грани центральной ступени первого и второго гасителя; l_3 — то же до начала ковша; α — угол поворота открылка первого порога; β — угол поворота открылка второго порога; γ — угол наклона сливной грани второго гасителя в сторону НБ; φ — угол наклона сливной грани первого гасителя в сторону НБ; $b_ц$, b_0 — ширина соответственно центральной части и открылка второго порога; $t_к$, $l_к$ — глубина и длина ковша

длиной по дну 3...10 м, с заложением верхового откоса $m_1=1{,}5...2$, низового — $m_2=2$, низовой откос ковша можно не крепить.

Общие недостатки всех растекателей, гасителей и расщепителей: быстрый износ углов из-за повреждения их плавающими предметами (льдинами, бревнами, наносами); кавитационная эрозия ребер и плоскостей.

5.5.2. ОСНОВНЫЕ КОНСТРУКЦИИ КРЕПЛЕНИЙ ПРИ ПОВЕРХНОСТНОМ РЕЖИМЕ СОПРЯЖЕНИЯ

Использование для гашения избыточной кинетической энергии потока поверхностного режима сопряжения позволяет до минимума сократить крепление НБ, уменьшить толщину плит и размеры каменной наброски. Сопряжение поверхностным режимом осуществляют с помощью носка-уступа или ковшовых колодцев различных типов.

Концевые части водосбросов, устроенные по типу носка-уступа, могут работать при нескольких поверхностных режимах, а также с донным режимом при сбросе малых расходов. При подборе высоты носка-уступа рассматривают всевозможные режимы его гидравлических условий работы для обеспечения необходимой устойчивости существования поверхностного режима.

Крепление НБ на скальном основании при поверхностном режиме сопряжения можно не устраивать. НБ на нескальных основаниях крепят бетонными плитами, каменной наброской, габионами, бетонными пирамидами и блоками.

Недостатки, указанные в таблице 5.22, несколько сдерживают использование поверхностного режима сопряжения в практике.

Ковшовые колодцы получили большое распространение благодаря возможности гасить большую часть избыточной энергии потока в пределах концевой части водосливной плотины, то есть в пределах ковша (табл. 5.26).

Эффективная конструкция расширяющегося в плане водобойного колодца низко- и средненапорных водопропускных сооружений разработана институтом «Союзгипроводхоз». Интенсификация процесса гашения достигается в ней за счет соударения струй и закрутки потока в вертикальной плоскости (рис. 5.27).

Рекомендуемые размеры конструкции при $Fr_1=10...60$ и $B/b>7$: длина колодца $L_k=(0{,}4...0{,}45)l_n$; глубина колодца $h_k=h_2$; высота порога $p_t=(0{,}9...0{,}95)\times(h_k-h_t)$ или $p_{t,min}=[2+0{,}06\times(Fr_1-10)]/h_1$; высота уступа $p=(1...1{,}5)h_1$; расстояние между основанием уступа и порогом $a=(0{,}6...0{,}75)l_n$; заложение откоса его наклонной грани $m=1{,}5...2$; радиус планового закругления участков $R=H/\sqrt{Fr_1}$, (l_n, h_2 — соответственно длина и вторая сопряженная глубина прыжка в призматическом русле; b и h_1 — соответственно ширина и глубина в конце подводящего водовода; Fr_1 — число Фруда, подсчитанное для сечения с глубиной h_1; H — напор на сооружение; B — ширина русла в НБ).

5.5.3. НБ ПРИ СОПРЯЖЕНИИ С ОТБРОСОМ СТРУИ

Преимущества рассматриваемого типа сопряжения в экономическом и техническом отношении предопределили его довольно ши-

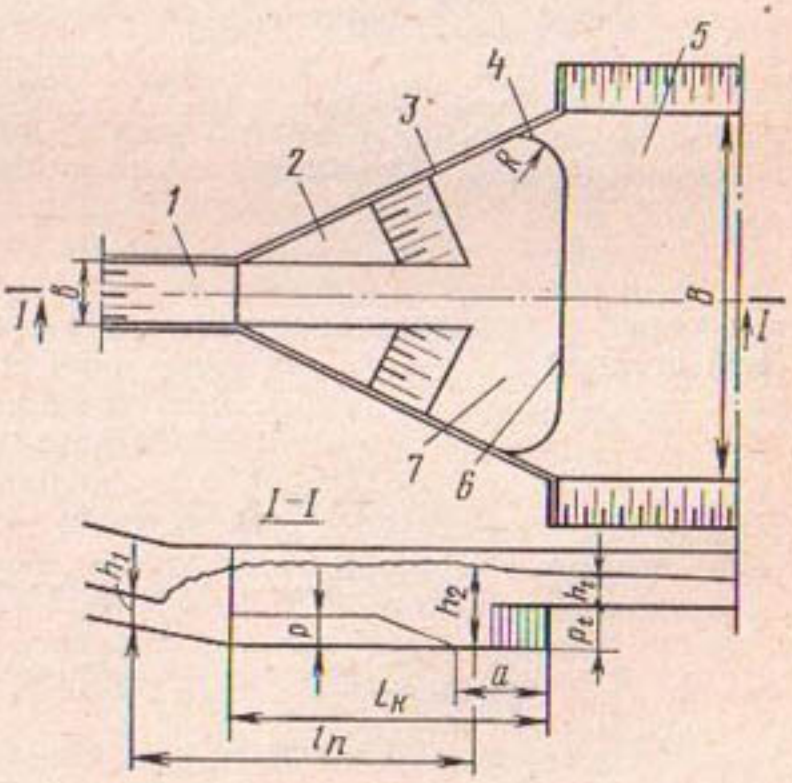
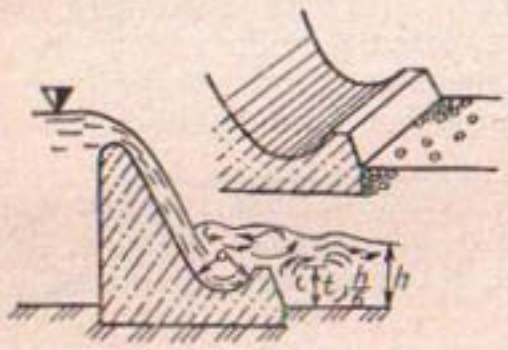
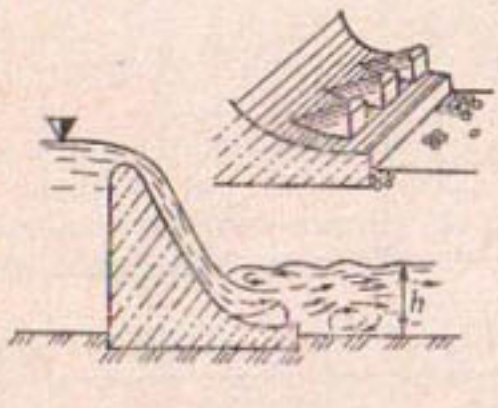
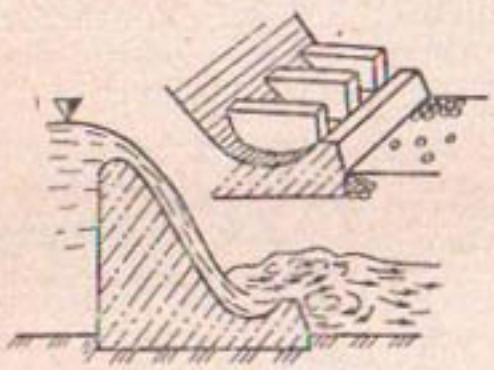
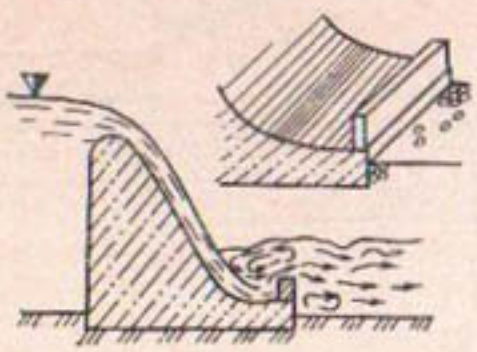


Рис. 5.27. Расширяющийся водобойный колодец Союзгипроводхоза:

1 — подводящий участок; *2* — боковые уступы в виде усеченных прямоугольных пирамид; *3* — вертикальные стенки; *4* — симметричные криволинейные участки сопряжения стенок колодца с порогом; *5* — отводящий водовод; *6* — порог; *7* — дно колодца

5.26. Типы ковшовых колодцев

Тип и схема колодца	Условия и особенности применения
Сплошной цилиндрический (уклон козырька — 45°; высота $1/6h_{t\ max}$) 	При глубине в 11Б, достаточной для затопления донного прыжка. Скорости в донном вальце за козырьком могут вызывать перемещение грунта в ковш и абразивную эрозию козырька
Щелевой 	Уменьшаются поверхностные и донные водовороты в ковше за счет диссипирующего воздействия, обеспечивается самоочищение от наносов и мусора. Уступает гладкому ковшу в диапазоне глубин, при которых он эффективен
Параболический с продольными ребрами 	Обеспечивает благоприятный поверхностный режим сопряжения с меньшей высотой волн. Более сложен в производстве работ
Обжатый с близкорасположенной стенкой 	Позволяет регулировать режим сопряжения изменением высоты стенки. В комбинации с обычным водобойным колодцем дает интенсивное гашение энергии в зоне ковша при сокращенной длине

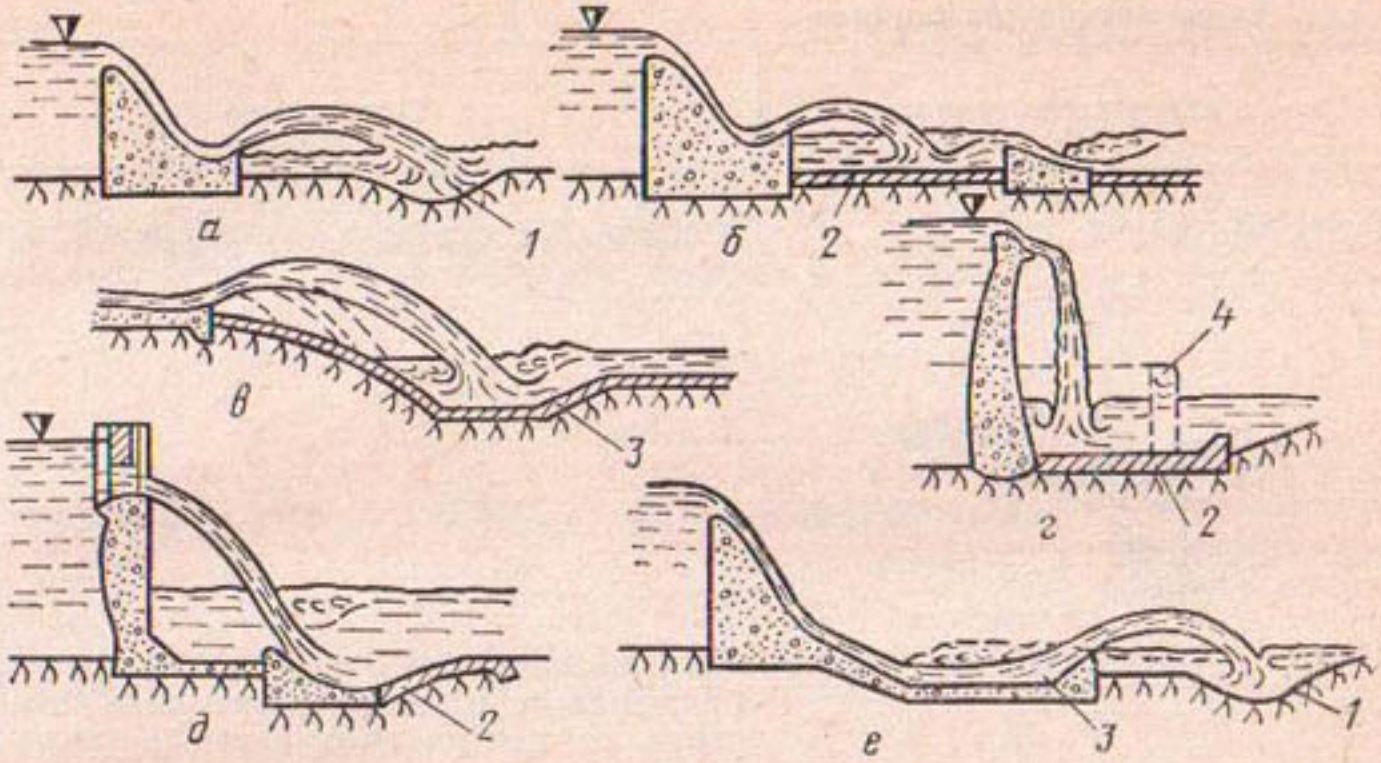


Рис. 5.28. Сопряжение с отбросом и свободным падением струи:

а — отброс с носка-трамплина на дно; *б* — отброс с носка-трамплина на специальное железобетонное покрытие, заанкеренное в скалу; *в* — отброс с носка-трамплина в колодец; *г* — свободное падение струи с гребня на водобой или в замкнутый водоем, образованный стенкой; *д* — отброс из глубинного отверстия на водобой; *е* — комбинированное гашение энергии; *1* — воронка размыва; *2* — железобетонное покрытие; *3* — колодец; *4* — стенка

рокое распространение. Чаще всего эту схему используют, когда основание в зоне сопряжения представлено достаточно прочной скалой, но при этом необходимо, чтобы размыв, образующийся на определенном расстоянии от концевой части водосброса, с течением времени не распространился вверх по течению, угрожая устойчивости сооружения, и чтобы зона боковых размывов не вызвала обрушения берегов и находящихся на них строений, сооружений и др.

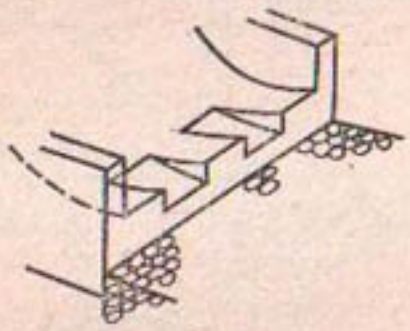
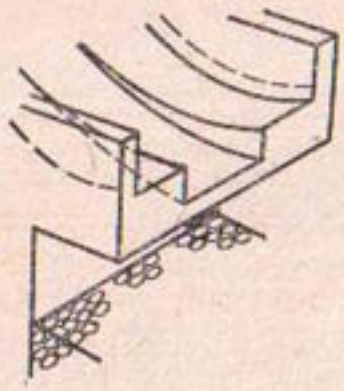
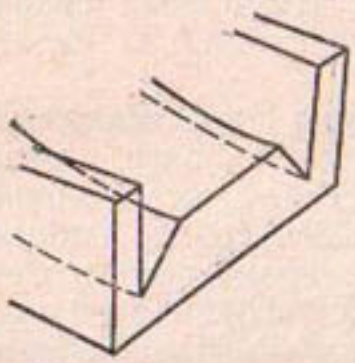
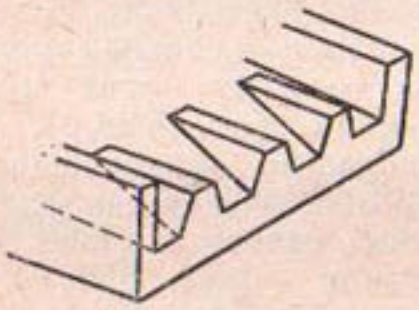
Отброс струи с носка-трамплина непосредственно в естественное русло (рис. 5.28, *а*) требует, чтобы участок падения был расположен в зоне самых больших глубин русла. Верховой откос воронки размыва всегда должен быть выше профиля низового откоса плотины, продолженного до наинизшей отметки размыва. Необходимо отдалить воронку на возможно большее расстояние от плотины, а также уменьшить возможную глубину размыва. Для этого удлиняют и сужают транзитную часть с помощью угла наклона носка-трамплина, расширяют струю на сходе; увеличивают глубину водяной подушки в месте падения.

Отброс струи в водобойный колодец или на специальное железобетонное покрытие (рис. 5.28, *б, в, г, д*) требует, чтобы бетонное крепление (водобой) охватывало всю зону падения струи, а над водобоем — водяная подушка была достаточной глубины. В отдельных случаях толщину этой подушки увеличивают, ограждая водобой специальной стенкой (рис. 5.28, *г*). Параметры плит назначают с учетом нагрузок и вибраций, возникающих под действием падающих струй. При необходимости обеспечения значительной ударной прочности плит при пульсациях давления сверху и снизу плиты осуществляют анкеровку водобоя к скале основания (рис. 5.28, *б*). Для предотвращения выпора плит под водобоем устраивают специальный дренаж.

Радиус цилиндрического носка-трамплина рекомендуют принимать 9...15 м, а кромку назначают не ниже отметки максимального уровня воды в НБ. Угол наклона носка — 15...35°. При больших значениях угла наклона длина отброса больше, но гашение сопровождается образованием волн и водяной пыли. Наиболее распространенные типы носков-трамплинов приведены в таблице 5.27.

Дальность отброса струи с носка-трамплина на плоскость зеркала воды

5.27. Типы носков-трамплинов

Тип и схема носка-трамплина	Достоинства
Зубчатый носок 	Расщепляет струю в вертикальной плоскости
Носки с направленным отбросом 	Обеспечивают регулирование условий сопряжения и размыва путем концентрации струи в центральной части носка-трамплина
	в боковых частях носка-трамплина
Носок с трапециевидными расщепителями 	Распространенная конструкция, позволяющая расширить струю в плане и в вертикальной плоскости для уменьшения нагрузок и размывов

(рис. 5.29) может быть вычислена по формуле

$$l = k_a v_1^2 \cos\alpha \left(\sin\alpha + \sqrt{\sin^2\alpha - 2gz_1/v_1^2}\right)/g, \qquad (5.16)$$

где k_a — коэффициент, учитывающий аэрацию и распад струи, равен 1 при $Fr < 35$ и 0,8...0,9 при $Fr > 35$; z_1 — превышение центра струи в начальном сечении над зеркалом воды, $z_1 = -z_c - 0{,}5\, h_1 \cos\alpha$; остальные обозначения см. на рисунке 5.29.

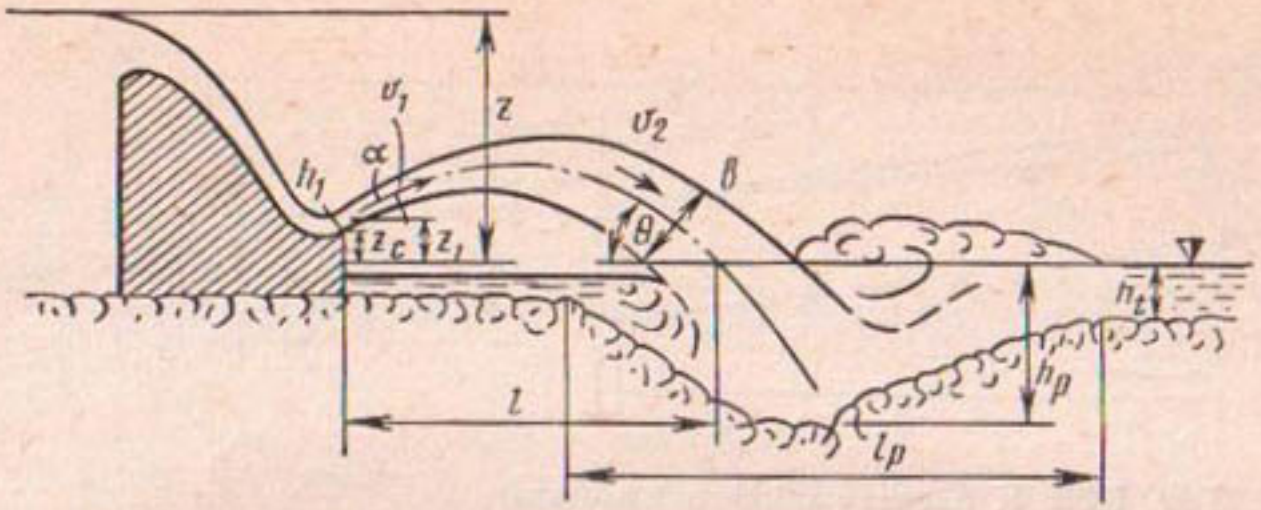


Рис. 5.29. Схема к расчету отброса струи с носка-трамплина:

v_1, h_1 — скорость и высота струи при сходе с носка-трамплина; v_2, b, θ — скорость, ширина и угол наклона струи при входе в толщу потока; α — угол наклона носка к горизонту (положителен при обратном наклоне, отрицателен при прямом); z_c, z_1 — превышение над зеркалом воды носка-трамплина и центра струи при сходе с него; l — дальность отброса струи; l_p, h_p — длина и глубина воронки размыва; h_t — глубина в НБ.

Свободное падение струи (см. табл. 5.22) отличается малой начальной скоростью и малой дальностью отлета. Такие струи, сливаясь с носка высокорасположенного водослива или отверстия, встречают свободную поверхность зеркала воды в НБ практически под прямым углом. Часть энергии гасится за счет аэрации при полете, остальная — при растекании в водяной подушке. При этом возможны два случая: струя рассеивается в толще воды, не достигая дна, и струя достигает дна, а затем симметрично расширяется. В первом случае давление на дно остается гидростатическим, во втором — для защиты дна от значительных размывов часто предусматривают специальные бетонные, водобойные колодцы. Дальность отброса свободнопадающих струй также определяют по формуле (5.16), однако угол α в этом случае часто имеет отрицательные значения.

5.6. РАЗМЫВЫ ДНА В НБ

После зарегулирования жидкого и твердого стока реки происходят трансформации ее русла в НБ гидроузла: общие и местные размывы.

Расчет переформирований речного дна в НБ водопропускных гидротехнических сооружений включает: прогноз понижения уровней воды из-за общего размыва; определение параметров воронки местного размыва и расчет планового расширения потока; корректировку результатов расчетов местного размыва по итогам прогноза планового расширения.

Общие размывы ведут к изменениям уровенного режима, что проявляется в нарушении естественной (бытовой) связи расходов и уровней воды в реке. Результаты прогнозов изменения уровенного режима следует учитывать при расчетах общей устойчивости сооружений; при расчетах фильтрации в подземном контуре и в обход сооружений; при выборе местоположения рабочих колес гидромашин (насосов, турбин); при обосновании принимаемого режима сопряжения бьефов, конструкции и размеров крепления (водобоя, рисбермы, ковша, гасителей и т. д.); при назначении отметок порогов судопропускных сооружений и т. д.

Общие размывы русл, сложенных несвязными однозернистыми и связными грунтами. При ограниченных исходных данных на предварительных стадиях проектирования общие размывы рассчитывают методом И. И. Леви (рис. 5.30), используя осредненные характеристики поперечных сечений. Уравнение баланса наносов в этом случае имеет вид

$$(\rho_1/\rho_s)\,\Delta V = \rho_{s0}\Delta t, \qquad (5.17)$$

где ρ и ρ_s — соответственно плотности грунта в аллювиальных отложениях и материала наносов; ΔV — объем грунта, размытого за время Δt; ρ_{s0} — транспортирующая способность потока за пределами зоны общего размыва.

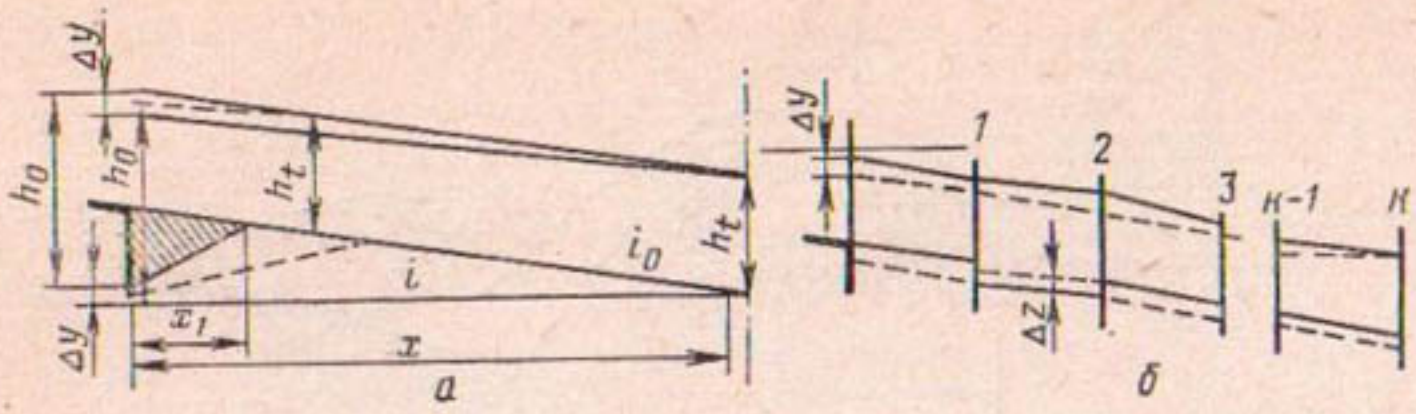


Рис. 5.30. К расчету общего размыва:
а — на всем участке размыва x; *б* — при разбивке русла на расчетные участки 1, 2, ..., k

Исходное русло в НБ представляют в виде призматического канала с шириной B, уклоном дна i_0, глубиной h_0, соответствующей прохождению руслоформирующего расхода Q_f, $h_0=Q_f/(Bv_{adm})$, где v_{adm} — предельная неразмывающая скорость водного потока.

Объем общего размыва дна от створа гидроузла до створа, удаленного на расстояние x, к моменту Δt (от момента пуска гидроузла в эксплуатацию до рассматриваемого) вычисляют по формуле

$$\Delta V = 0{,}5B\,[(h_0 - h_t)\,(x - x_1) + \Delta y x], \qquad (5.18)$$

где h_t — глубина воды в НБ; x_1 — длина участка местного размыва, при отсутствии данных приближенно принимают 200...500 м; Δy — понижение уровня воды в створе гидроузла.

При уточненных расчетах НБ разбивают на участки длиной Δx ($\Delta x \geqslant \geqslant 2...3\,B$) (рис. 5.30, *б*), с соблюдением принципа однообразия плановых очертаний русла и его рельефа на каждом расчетном участке. Для створов, являющихся границами участков, строят кривые связи расходов и уровней. Изменение глубин потока и ширины русла в пределах участка может быть принято линейным.

Деформации русла на каждом участке рассчитывают по уравнению баланса наносов

$$(\rho_s/\rho)\,(\Delta Q_s/\Delta x) = H\Delta B/\Delta t - B\Delta z/\Delta t, \qquad (5.19)$$

где ΔQ_s — расход наносов на участке Δx; H — глубина русла от дна до уровня бровок; ΔB — ширина размыва береговой линии, $H\Delta B/\Delta t = k_b Q_s/B$ (Q_s — общий расход наносов на участке размыва x); Δz — толщина слоя деформации дна; k_b — коэффициент, зависящий от вида грунтов, слагающих русло, и определяемый в общем случае по зависимости,

$$k_b = n/[\rho_s/\rho_w + c_y^n/(\rho_w g d_m)]^2, \qquad (5.20)$$

где c — пористость грунта; ρ_s, ρ_w — плотность наносов и воды соответственно; c^n_y — усталостная прочность грунта на размыв (см. гл. 6). Для среднезернистых однородных песчаных грунтов принимают $k_b \simeq 0{,}05$, для мелкозернистых заиленных песков $k_b \simeq 0{,}01...0{,}005$.

Береговые деформации следует учитывать лишь в тех случаях, когда они сопоставимы по своим параметрам с деформациями дна, например в широких речных руслах при $B/h \geqslant 200$. Аналогично следует поступать и в тех случаях, когда берега сложены более прочными породами, чем аллювиальные отложения на дне.

Общие размывы русл, сложенных несвязными разнозернистыми грунтами ($d_{95}/d_5 > 5$). Процесс переформирования дна в этих грунтах сопровождается выносом фракций вплоть до того момента, пока скорости не достигнут некоторого значения v_{lim}, при котором в русле прекратится движение крупных частиц и поверхность размыва покроется слоем отмостки. Такое явление ха-

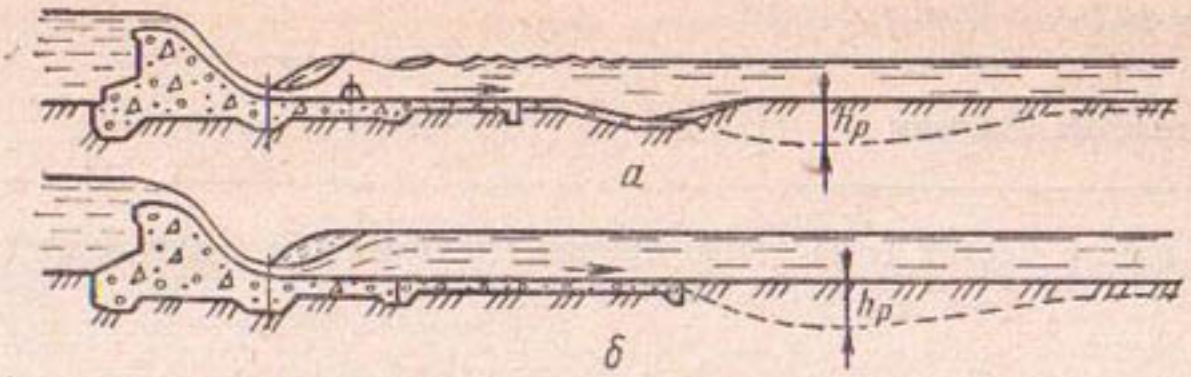


Рис. 5.31. Схемы местного размыва за плотиной:
а — при устройстве за рисбермой ковша; *б* — при наличии зуба в конце рисбермы

рактерно прежде всего для горных и предгорных участков рек. Деформации в этом случае рассчитывают в две стадии: I — расчет по предельному состоянию (определение продольного профиля русла, размытого до образования самоотмостки при расчетном расходе воды); II — последовательный расчет трансформации русла от его исходного состояния до достижения глубин h_{im}, соответствующих при расчетных расходах результатам расчета I стадии поверхности самоотмостки.

За расчетный расход принимают либо руслоформирующий расход Q_f, либо расход, обусловленный конкретной пропускной способностью водопропускных сооружений гидроузла. Крупность грунта при расчетах II стадии принимают равной средней крупности грунтов донных отложений.

Схема расчета самоотмостки по В. С. Кнорозу приведена в таблице 5.28.

Местные размывы (рис. 5.31) возникают в НБ водопропускных сооружений вследствие неполного гашения избыточной энергии потока воды в пределах крепления; возникновения сбойности потока в НБ, приводящей к концентрации расходов в зоне транзитного течения; переосветления потока на участке ВБ и т. д. При прогнозе размеров и местоположения воронок местного размыва определяют максимальную глубину размыва и ее местоположение (фокус размыва), устанавливают ширину, длину и заложение откосов воронки размыва, рассчитывают величину обнажения зуба или вертикальной стенки концевого крепления. Расчеты местных размывов выполняют как для строительного, так и для эксплуатационного периодов.

Максимальную глубину размыва при донном режиме сопряжения в плоских условиях в общем случае определяют из зависимости

$$h_p = k_p \sqrt[1,2]{q_p/v_{\text{adm1}}}, \qquad (5.21)$$

где k_p — коэффициент условий размыва, $k_p=1{,}05$, если рисберма заканчивается ковшом, и 1,7 — когда в конце рисбермы устраивают зуб или вертикальную стенку; v_{adm1} — допустимая средняя скорость при глубине воды, равной 1 м; q_p — удельный расход в конце рисбермы, $q_p=Q/[nb+(n-1)b_b]$ (n — число отверстий; b и b_b — соответственно ширина водосливного отверстия и быка; Q — расход сооружения).

Для неоднородного несвязного грунта, крупные включения которого при вымыве мелких фракций образуют естественную отмостку дна, максимальную глубину размыва более удобно вычислять по формуле К. И. Россинского

$$h_p = k_p \sqrt[1,2]{q_p/v_{\text{adm}} + \Delta/n}, \qquad (5.22)$$

где v_{adm} — допустимая скорость, отвечающая наименьшему диаметру частиц, образующих отмостку; Δ — толщина слоя отмостки, обычно ее принимают равной $2...3\,d_{\text{cr}}$, для гравийно-галечникового материала отмостки $\Delta=10$ см; n — относительное содержание крупных включений по объему.

5.28. Схема расчета самоотмостки

Определяемые величины	Расчетные зависимости
Средний диаметр частиц самоотмостки d_{cr}	По кривой гранулометрического состава из условия $d_{95}/d_5=5$
Относительное содержание частиц самоотмостки в речных отложениях k_{cr}	$k_{cr}=1-k_{mk}=(100-Pn)/100$ (1) k_{mk} и P — относительное и процентное содержание более мягких фракций; n — номер интервала гранулометрической кривой для d_{min} самоотмостки
Средний диаметр частиц мягкого грунта, то есть фракций, не входящих в самоотмостку d_{mk}	$d_{mk}=\left(\sum_{j=1}^{n-1} d_j\Delta P_j\right)\Big/\sum_{j=1}^{n}\Delta P_j,$ (2) d_j и ΔP_j — средний диаметр и процентное содержание фракций по гранулометрической кривой
Неразмывающие скорости $v_{adm\,1}$ и $v_{adm\,2}$, соответствующие d_{cr} и d_{mk}	По таблицам (6.12)...(6.15) при начальной глубине h
Скорость потока v_{ilm}, при которой образуется самоотмостка	$v_{ilm}=v_{adm1}(k_{cr}\sqrt[4]{d_{cr}/h}-0{,}008(1-k_{cr})/(1+k_{cr})\times\lg h/d_{cr})$ (3)
Число слоев отмостки	$m_{cr}=0{,}013(v_{ilm}/v_{adm2})^5$ (4)
Понижение дна за счет выноса мягких фракций	$\Delta z=m_{cr}d_{cr}(1-k_{cr})/k_{cr}$ (5)
Глубина потока с расходом Q в русле шириной B с отмосткой дна	$h_{ilm}=Q/(Bv_{ilm})+\Delta z$ (6)

Примечание. Область применения формул: (6) имеет опытное обоснование при $k_{cr}=0{,}1...0{,}4$ и $h/d_{cr}=10...150$. В этом диапазоне изменений h/d_{cr} формула (3) справедлива при $k_{cr}(h/d_{cr})^{0{,}25}<1{,}35$; если $k_{cr}(h/d_{cr})^{0{,}25}\geqslant 1{,}35$ можно принимать $v_{ilm}=v_{adm1}$, что дает погрешность, не превышающую 5%. При $k_{cr}\geqslant 0{,}3$ и $h/d_{cr}\geqslant 150$ также можно принимать $v_{ilm}=v_{adm1}$. m_{cr} и Δz определяют при $k_{cr}<0{,}3$. При больших значениях k_{cr} величиной Δz в расчетах можно пренебречь.

Максимальную глубину размыва при поверхностном режиме и режиме с отбросом струи определяют по формуле

$$h_p=k_e(3{,}4+0{,}45z/h_{cr})[q_p/(1{,}15\sqrt{g}\,d_m^{0{,}25})]^{0{,}8}, \quad (5.23)$$

где k_e — коэффициент, учитывающий влияние режима сопряжения бьефов, при поверхностном режиме $k_e=0{,}4$, для режима с отбросом струи в зависимости от типа сливного устройства: для водосливной стенки — 1; водосливно-

го порога — 0,8; носка-трамплина — 0,667 (плоская задача); 0,56 (полупространственная задача) и 0,44 (пространственная задача); z — перепад между уровнями бьефов; n — коэффициент, учитывающий потери на расщепление и аэрацию, $n \simeq 0{,}9$ при числе Фруда $Fr \simeq 0{,}25$, 0,85 при $Fr = 50$; 0,6 при $Fr = 100$; d_m — средний диаметр частиц грунта; h_{cr} — критическая глубина потока.

Для режима отброшенной струи за носком-трамплином максимальную глубину и длину воронки размыва можно определить по формулам:

для связных и скальных пород

$$h_p = [(8{,}3v_2 b/v_{\Delta p} - 7{,}5b)\sin\theta/(1 - 0{,}175\operatorname{ctg}\theta)] + 0{,}25h_1; \qquad (5.24)$$

для несвязных грунтов

$$h_p = [(4{,}5\ldots 6v_2 b/w - 7{,}5b)\sin\theta/(1 - 0{,}175\operatorname{ctg}\theta)] + 0{,}25h_1; \qquad (5.25)$$

$$l_p = 4{,}5h_p + 2h_{cr}, \qquad (5.26)$$

где w — гидравлическая крупность частиц (см. табл. 6.18); $v_{\Delta p}$ — допускаемая донная скорость в стабилизированной воронке размыва, $v_{\Delta p} \simeq 3v_{\Delta adm}$ для связных грунтов; $v_{\Delta adm}$ — допускаемая неразмывающая скорость на высоте выступов шероховатости (см. гл. 6); остальные обозначения даны на рисунке 5.29.

Глава 6 МЕЛИОРАТИВНЫЕ КАНАЛЫ И ТРУБОПРОВОДЫ

6.1. КЛАССИФИКАЦИЯ И УСЛОВИЯ ПРИМЕНЕНИЯ МЕЛИОРАТИВНЫХ ВОДОВОДОВ

Водовод — искусственное сооружение (канал, лоток, трубопровод, тунель), служащее для подвода, распределения и отвода воды.

Транспортирующий водовод на мелиоративных системах в зависимости от рельефа местности и пропускаемого расхода воды выполняют в виде рационально протрассированного канала со спокойным или бурным режимом потока, напорного или самонапорного трубопровода.

Мелиоративные водоводы классифицируют по различным признакам (табл. 6.1). Водовод выбирают на основе технико-экономического расчета, исходя из рельефа местности, гидравлических параметров, стоимости электроэнергии, строительно-монтажных работ, строительных материалов и изделий. Практика проектирования мелиоративных систем в различных природно-экономических зонах позволила определить области оптимального использования различных видов водоводов (рис. 6.1). Для конкретных условий границы этих областей могут несколько смещаться.

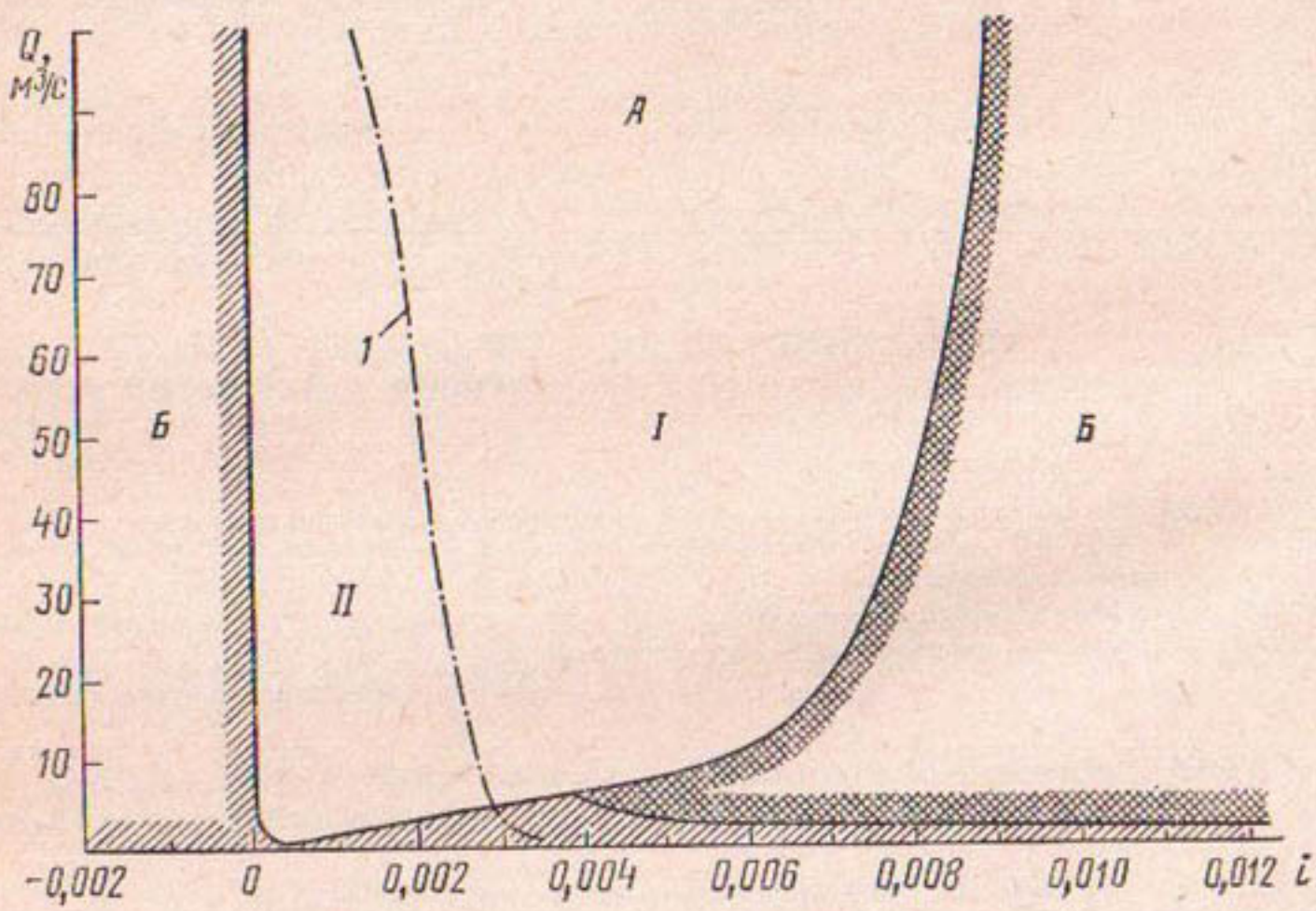


Рис. 6.1. Ориентировочные области применения трубопроводов и каналов:
1 — граница спокойного и бурного состояния потока в каналах; *I* — каналы с бурным состоянием потока; *II* — каналы со спокойным состоянием потока; *А* — область применения каналов; *Б* — область применения напорных трубопроводов

6.1. Классификация мелиоративных водоводов

Признак классификации	Тип водовода	Выполняемые функции и особенности работы
По мелиоративному назначению	Каналы и трубопроводы:	
	оросительные	Подвод воды от источника до поливной техники и орошаемых участков
	водосборно-сбросные	Сбор и отвод с территории оросительной системы ливневых и талых вод; воды из распределителей и оросителей при технологических сбросах, опорожнении, авариях; сбросной воды с полей при поверхностном поливе и дождевании
	осушительные (дренажные)	Сбор и отвод дренажных вод в водоприемники
	обводнительные	Подвод воды от источника до места водопотребления в безводных и маловодных районах
	оросительно-обводнительные, осушительно-увлажнительные и т. д.	Совмещение нескольких функций
По способу подачи воды		
Каналы	Самотечные	Режим потока определяется уклоном местности и пропускаемым расходом
	Машинные (с механическим подъемом воды)	Режим потока регулируют насосные агрегаты
Трубопроводы	Безнапорные	Труба работает неполным сечением
	Самонапорные	Движение воды под напором, создаваемым уклоном местности
	Напорные:	Напор создается насосом
	низконапорные	Напор в трубах до 0,5 МПа
	высоконапорные	Напор в трубах свыше 0,5 МПа
По взаимодействию в мелиоративной сети:		
оросительные	Магистральный канал (трубопровод) и его ветви	Подвод воды от водозабора к следующему звену оросительной сети — межхозяйственным распределителям
	Распределители различных порядков:	
	межхозяйственные	Подвод воды от магистрального канала во внутрихозяйственные распределители к группам водопользователей
	внутрихозяйственные	Подвод воды к отдельным хозяйствам или внутри хозяйства к оросителям

Продолжение

Признак классификации	Тип водовода	Выполняемые функции и особенности работы
	оросители	Оросительный канал или трубопровод (переносной, стационарный) для подвода воды на орошаемое поле в поливные борозды или полосы, к дождевальным машинам и установкам
	Водосбросные каналы	Прием поверхностных и сбрасываемых вод с территории оросительных систем
	Сбросные каналы, лотки, трубопроводы	Прием и отвод воды из водосбросных каналов, распределителей и оросителей
осушительные (дренажные)	Проводящий (магистральный) канал	Прием и отвод воды в водоприемник из впадающих в него коллекторов
	Коллекторы различных порядков (открытые или закрытые)	Прием и отвод воды из впадающих в них собирателей и осушителей (дрен)
	Собиратели	Своевременный отвод избыточных поверхностных вод
	Осушители (дрены открытые или закрытые)	Понижение уровня грунтовых вод в требуемые сроки
оградительные	Нагорные каналы	Перехват поверхностных вод, стекающих с водосбора
	Ловчие каналы	Перехват подземных вод, поступающих с водосбора

6.2. КАНАЛЫ. ОСОБЕННОСТИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ. УНИФИКАЦИЯ СЕЧЕНИЙ

Канал — искусственный водовод в земляном русле или из сборных элементов, уложенных на поверхности земли или на опорах (лоток).

Каналы классифицируют по назначению (см. табл. 6.1), по особенностям конструкции и условиям работы (табл. 6.2).

Как и другие гидротехнические сооружения, их подразделяют на четыре класса (см. табл. 1.3).

Оросительные каналы прокладывают на отметках, позволяющих командовать над возможно большей площадью, с учетом иерархической взаимосвязи их работы, то есть должно обеспечиваться командование временных или поливных оросителей над орошаемой площадью (на 0,5...0,1 м), участковых — над поливными (на 0,05...0,1 м) и над переносными трубопроводами (на 0,15...0,2 м) и т. д. Подводящие каналы НС прокладывают с возможно меньшим уклоном для обеспечения резерва воды в бьефах. Осушительные каналы и водоприемники (реки, каналы) трассируют по наинизшим отметкам местности, исключая подпор по всей трассе водоприемника. При соответствующем обосновании допускают подпор уровня старшего канала при пропуске максимальных расходов для самотечных осушительных систем и в отдельные периоды — в системах с машинным водоподъемом.

Параметры и формы поперечного сечения каналов определяют гидравлическим расчетом в зависимости от схемы водораспределения или водо-

6.2. Классификация каналов по конструкциям и условиям работы

Принцип классификации	Тип канала	Условия и особенности применения
По конструкции	Грунтовые необлицованные	Каналы в прочных и слабофильтрующих грунтах; каналы оросительных систем при КПД не ниже 0.9. Устойчивости русла достигают назначением неразмывающих скоростей; противофильтрационная защита — естественное экранирование
	Грунтовые облицованные	До 70% строящихся мелиоративных каналов. Допускают повышение скорости потока; противофильтрационная защита — искусственные и комбинированные облицовки и экраны
	Лотковые	При неблагоприятных топографических и геологических условиях, на участках в насыпи, с фильтрующими и просадочными грунтами; на оползающих косогорах со скальными грунтами
По условиям использования	Постоянные: основные	Магистральные (оросительные и осушительные) и их ветви
	второстепенные	Внутрихозяйственные оросительные, коллекторы и др.
	Временные	Временные оросители и дрены
По технологии работы	С непрерывным циклом	Магистральные и межхозяйственные каналы (последние не всегда)
	С прерывистым циклом	Внутрихозяйственные оросители, коллекторы и дрены
По условиям трассировки	В выемке	При обеспечении командования (или без подпорного отвода) по условиям местности; каналы в косогорах
	В насыпи	Для обеспечения самотечной водоподачи; при пересечении трассы с понижениями рельефа; на рисовых системах
	В полувыемке-полунасыпи	Большинство каналов: русло в выемке, дамбы из вынутого грунта. Каналы на косогоре с устройством дамбы, сопряженной с основанием ступенями

сбора для установившегося (равномерного или неравномерного) или нестационарного режима движения воды (см. п. 6.3). Расчетные расходы при этом для оросительных каналов назначают по таблице 6.3.

Коэффициент форсировки k_f зависит от расхода воды в системе Q:

Q, м³/с	Менее 1	1...10	10...50	50...100	Более 100
k_f	1,2	1,15	1,1	1,05	1

6.3. Расчетные расходы оросительных каналов

Расчетный расход	Определяющие величины	Расчетные элементы конструкций каналов
Максимальный	Наибольшая ордината графика водоподачи	Гидравлические элементы сечения
Минимальный	Наименьшая ордината графика водоподачи	Проверка уровней воды, обеспечивающих водозабор и незаиляемость; местоположение подпорных сооружений
Форсированный	Максимальный расход, увеличенный на коэффициент форсировки	Превышение дамб и бровок берм над уровнем воды в канале; проверка неразмываемости

Коэффициент полезного действия $E_b = Q_{nt}/Q_{br}$, где Q_{nt} — забираемый из канала расход; Q_{br} — максимальный расход в начале канала. Для магистральных каналов и их ветвей E_b должен быть не менее 0,9, для распределителей различных порядков и оросителей — не менее 0,93.

Гидравлический расчет осушительных каналов проводят при расходах воды более 0,5 м³/с, при меньших расходах — в тех случаях, когда уклон канала превышает 0,0005 — для песчаных, 0,003 — для суглинистых и 0,005 — для глинистых грунтов.

Осушительные проводящие и ограждающие каналы рассчитывают на пропуск расходов весеннего и летне-осеннего паводков на уровне бровок, предпосевного — на 0,5...0,6 м ниже бровки канала; осушители рассчитывают на расход, определяемый грунтовым стоком.

Поперечное сечение оросительных каналов принимают, как правило, трапецеидальной формы. Другие формы допускают при надлежащем обосновании. Более подробно см. п. 6.3. Рекомендуемые формы поперечных сечений осушительных каналов даны в томе «Осушение» (с. 208).

Заложение откосов постоянных каналов мелиоративных систем принимают на основании данных по устойчивости откосов существующих каналов в аналогичных гидрогеологических и геологических условиях; при отсутствии аналогов заложения откосов каналов с глубиной выемки до 5 м принимают по таблице 6.4, а при глубине более 5 м — на основании геотехнических расчетов. Для предварительных оценок рекомендуется пользоваться номограммой, показанной на рисунке 6.2.

6.4. Коэффициенты заложения откосов каналов в зависимости от грунта, слагающего русло

Грунты	Заложение откосов	
	подводных	надводных
Скальный грунт	0...0,5	0...0,25
Полускальный грунт	0,5...1	0,5
Галечник и гравий с песком	1,25...1,5	1
Глина; суглинок тяжелый и средний; торф мощностью до 0,7 м, подстилаемый этими грунтами	1...1,5	0,5...1
Суглинок легкий; супесь; торф мощностью до 0,7 м, подстилаемый этими грунтами	1,25...2	1...1,5
Песок мелкий; торф мощностью до 0,7, подстилаемый этим грунтом	1,5...2,5	1...2
Песок пылеватый	3...3,5	2,5
Торф со степенью разложения до 50%	1,25...1,75	1,25
Торф со степенью разложения более 50%	1,5...2	1,5

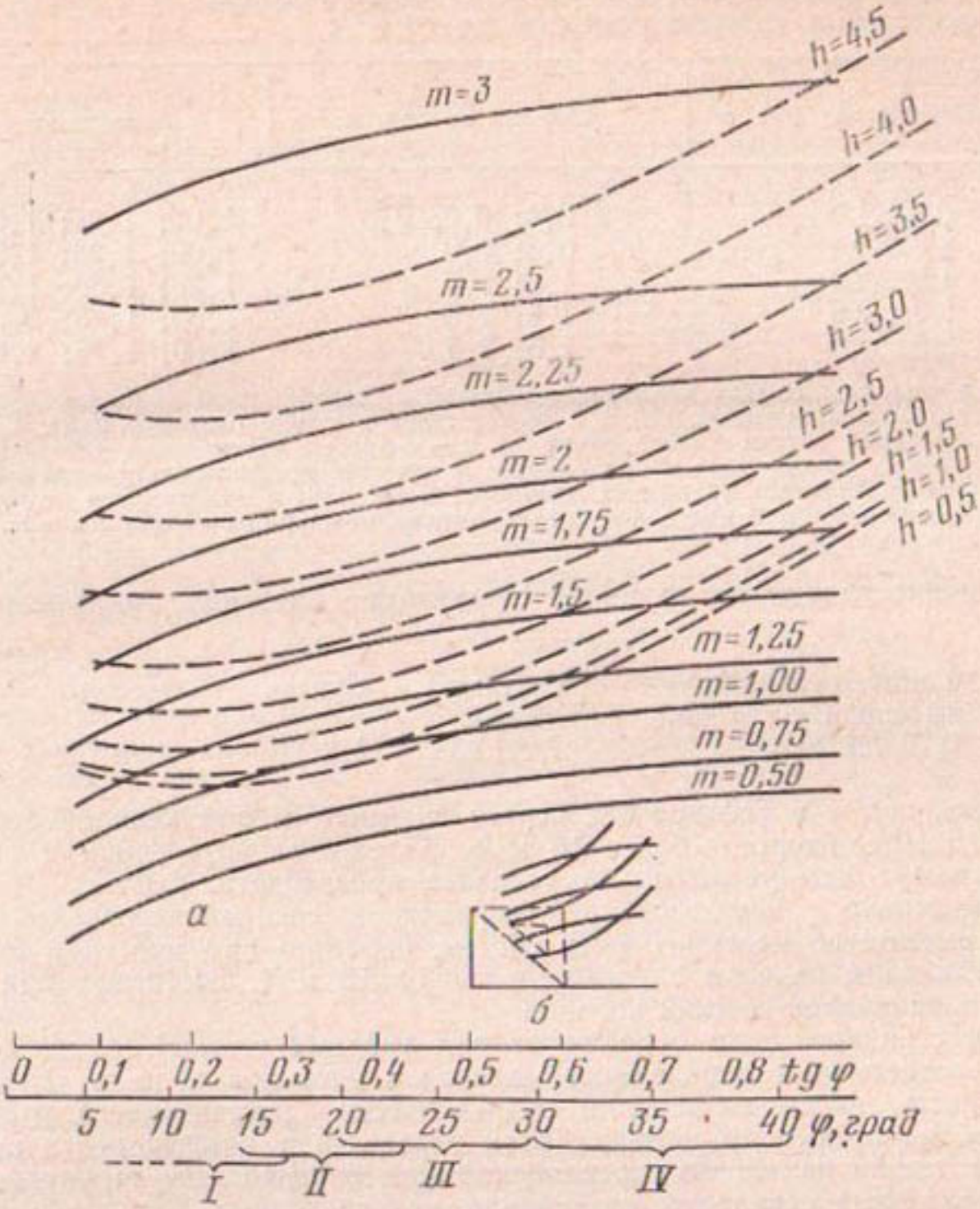


Рис. 6.2. Номограмма для определения заложения откосов мелиоративных каналов:

а — семейства кривых $m=f(\operatorname{tg}\varphi)$ и $h=f(\operatorname{tg}\varphi)$; *б* — ключ к номограмме; *I* — глина; *II* — суглинок; *III* — супесь; *IV* — песчаные грунты

Способ пользования номограммой (прямая задача): по заданным значениям глубины канала h_1 и угла внутреннего трения грунта $\operatorname{tg}\varphi_1$ определить устойчивое заложение откоса m. Располагают треугольник (рис. 6.2, *б*) таким образом, чтобы один из катетов прошел через заданную отметку $\operatorname{tg}\varphi_1$, перпендикулярно оси, а вершина прямого угла легла на кривую $h—h_1$. Тогда значение m ближайшей левой кривой $m=f(\operatorname{tg}\varphi)$, которую пересечет второй катет, даст искомое заложение откоса.

Обратная задача: определить, до какой глубины устойчив откос с заложением m_1 в грунтах с $\operatorname{tg}\varphi_1$. Треугольник располагают таким образом, чтобы один катет прошел через кривую m_1, а второй — через значение $\operatorname{tg}\varphi_1$. Ближайшая кривая $h=f(\operatorname{tg}\varphi)$, на которую попадает вершина прямого угла, даст искомую глубину.

Заложение наружных откосов дамб каналов, устраиваемых в насыпи или полунасыпи, при напоре воды более 3 м принимают по аналогии с плотинами из грунтовых материалов (см. табл. 6.4), при высоте дамб до 3 м

6.5. Стандартные параметры трапецеидального сечения оросительных каналов расходом до 10 м³/с

Строительная глубина, м	Ширина по дну, м	Заложение откоса
0,5...1,0	0,4; 0,6; 0,8	1,00; 1,25; 1,50
1,0...1,5	0,8; 1,0	1,00; 1,25; 1,50
1,5...2,0	1,0; 1,5	1,25; 1,50; 1,75; 2,0
2,0...2,5	1,5; 2,5	1,50; 1,75; 2,00
2,5...3,0	1,5; 2,5	1,50; 1,75; 2,00

Примечание. Для каналов со сборной железобетонной облицовкой шаг строительной глубины принимают 0,25 м в соответствии с шагом размеров плит, а для каналов с монолитной бетонной облицовкой 0,1 м — с учетом технических характеристик бетоноукладочных машин. При использовании в качестве противофильтрационной облицовки и противоэрозионного крепления железобетонных плит в зависимости от конструкции их сопряжения в донной части допускают отклонение ширины по дну до ±5%.

коэффициент заложения m имеет следующие значения в зависимости от грунта:

Глина, суглинок тяжелый и средний	Суглинок легкий	Супесь	Песок
0,75...1	1...1,25	1...1,5	1,25...2

Здесь, как и в таблице 6.4, первое значение m для каналов с расходом менее 0,5 м³/с, второе — более 10 м³/с. Заложения внутренних и наружных откосов могут быть увеличены по условиям производства работ.

Эффективного использования современной специализированной техники при строительстве мелиоративных систем, особенно при массовом строительстве небольших каналов с расходом до 10...15 м³/с, достигают при ограничении типоразмеров сечений каналов.

При стандартизации определяют ряд типовых сечений, каждому из которых соответствует определенный диапазон расходов воды и уклонов дна. Погрешность, вносимая заменой гидравлически рассчитанного русла стандартным, не превышает неточностей в определении коэффициента шероховатости, а также неизбежных отклонений при производстве строительных работ. Отраслевые стандарты на сечения мелиоративных каналов с расходом воды до 10 м³/с регламентируют его выбор (табл. 6.5, 6.6; рис. 6.3). Предусмотренные типоразмеры могут пропускать расходы воды значительно больше 10 м³/с при соответствующем увеличении уклона.

Привязку типового сечения к конкретным типам каналов, гидрогеологическим и грунтовым условиям проводят на базе двух-трех вариантов сечения для одного расхода воды и уклона дна (глубокого и мелкого), что позволяет более гибко приспособиться к особенностям рельефа.

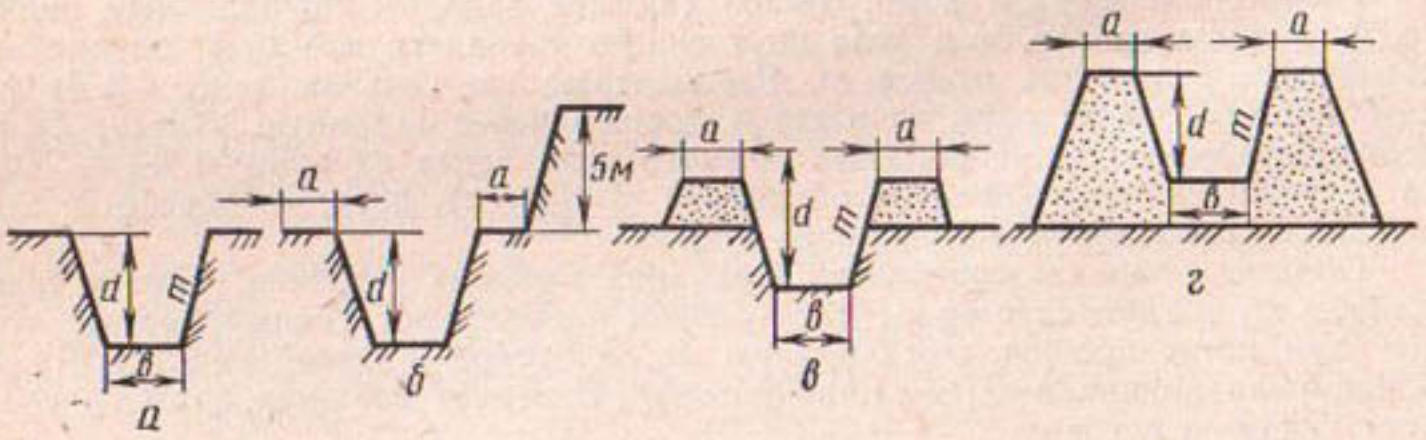


Рис. 6.3. Стандартные поперечные сечения каналов оросительных систем: *а* — в выемке глубиной до 5 м; *б* — в выемке глубиной более 5 м; *в* — в полунасыпи; *г* — в насыпи

6.6. Стандартные параметры поперечных сечений осушительных каналов

Тип каналов	Строительная глубина, м	Ширина по дну, м	Заложение откосов
Проводящие	0,8 до 1,5	0,4; 0,6; 0,8	1,0; 1,5; 2,0
Регулирующие	1,5 до 2,5	0,6; 0,8; 1,0; 1,5	1,5; 2,0; 2,5
Нагорные и нагорно-ловчие	2,5 до 3,5	0,6; 0,8; 1,0; 1,5; 2,0	2,0; 2,5
Ложбины	от 0,3 до 0,5	0,0	5...8

Примечание. При наличии специализированных машин допускают устройство каналов с шириной по дну 0,25 м.

При прохождении в неустойчивых грунтах (просадочных, плывунных и т. п.) геометрические параметры сечений назначают с учетом мероприятий по стабилизации основания и откосов канала. При прохождении каналов в грунтах выше IV группы трудности разработки, параметры сечений назначают исходя из конкретных условий.

Ширину бермы или дамбы канала назначают в соответствии с техническими характеристиками машин и технологией производства работ по устройству русла канала, противофильтрационных и защитных мероприятий. Минимальную ширину дамбы принимают на основании фильтрационных расчетов. Превышение гребня дамб и бровки берм над максимальным уровнем воды в канале определяют при расходе до 100 м³/с по таблице 6.7, при расходе свыше 100 м³/с — по формуле (4.1) с учетом волнового воздействия.

Промежуточные бермы устраивают в откосах каналов, проходящих в выемках глубже 5 м, для повышения их устойчивости. Бермы шириной 1...3 м располагают выше максимального уровня воды через каждые 5 м по высоте. Вдоль берм устраивают кюветы для сбора ливневых вод. Первую берму делают на высоте $h+\Delta h$ [h — максимальная глубина воды в канале; Δh — превышение бермы (см. табл. 6.8)].

6.7. Высота дамб и бровки берм над максимальным уровнем воды в канале, см

Расход воды в канале, м³/с	Канал без облицовки и с грунтопленочным покрытием	Канал с облицовкой
До 1	20	15
1...10	30	20
10...30	40	30
30...50	50	35
50...100	60	40

Радиус закругления канала назначают с учетом площади сечения канала S, режима работы, типа облицовки и т. п. Минимальные значения для каналов в земляном русле: $r=11\,v^2_m\sqrt{S+12}$; для каналов с монолитными бетонными, сборными железобетонными и асфальтобетонными облицовками $r=5B$, B — ширина канала поверху.

Радиусы поворотов гидравлически нерассчитываемых осушительных каналов должны быть не менее 20 м, остальных — не менее $5B$.

Внешний резерв грунта вдоль канала закладывают на расстоянии, определяемом в зависимости от способа производства работ и устойчивости откоса дамбы, от подошвы откоса дамбы не менее 1,5 м при глубине выработки грунта 0,5 м и 3 м при глубине выработки более 0,5 м. Расстояние от бровки выемки до подошвы отвала принимают: при глубине выемки до 2,5 м — 3 м; 2,5...5 м — 5 м; более 5 м и при слабых грунтах — по расчету устойчивости откоса; допускают его увеличение, исходя из условий производства работ.

Лотковые каналы — бетонные или железобетонные лотки, установленные по трассе водовода на свайных и стоечных опорах, фундаментных плитах или уложенных непосредственно на поверхности земли в зависимости от рельефа местности.

Трассировку лотков ведут по наибольшему уклону местности для уменьшения поперечного сечения и возможности распределения воды на обе стороны (двухстороннее командование).

Определение расчетных расходов и гидравлический расчет лотков проводят аналогично грунтовым каналам. КПД лоткового канала принимают не менее 0,95. Скорости течения воды в лотках принимают не более 6 м/с, минимальную скорость назначают из условия обеспечения транспортирования наносов.

Очертания лотков — параболическое или прямоугольное (при бурных режимах потоков). При расходе до 5 м³/с лотки имеют параболическое очертание по уравнению $x^2=2py$, параметр которого p меняется в зависимости от глубины от 0,45 до 4,2.

Глубину лотка назначают из условия превышения бортов над максимальным уровнем не менее чем на 10 см, а при использовании автоматического регулятора уровня — согласно условию

$$h_L \geqslant d_L + h_f + \Delta h,$$

где h_L — глубина лотка; d_L — глубина наполнения при пропуске расчетного расхода; h_f — гидравлические потери в регуляторе; Δh — превышение борта лотка над максимальным уровнем, равное 5 см.

Лотки с различной глубиной сопрягают совмещением дна смежных лотков. Подошвы стоек лотковых опор располагают на глубине не менее глубины промерзания грунтов основания.

Конструкции лотковых каналов, их опор и фундаментов даны в томе «Строительство» (с. 327, 332).

6.3. ГИДРАВЛИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ КАНАЛОВ

6.3.1. НАЗНАЧЕНИЕ И СОСТАВ РАСЧЕТОВ

Основная задача гидравлического расчета — определение устойчивой формы и параметров живого сечения потока с требуемым расходом. Поперечные сечения каналов принимают, как правило, трапецеидальной формы. Допускают применение сечений полигональной, параболической или прямоугольной формы (рис. 6.4) в зависимости от геологических условий и способа производства работ.

Гидравлические элементы живого сечения потока различной формы приведены в таблице 6.8.

Отношение ширины канала по дну к глубине его наполнения для трапецеидальных сечений принимают в зависимости от расхода воды Q и заложения откоса m по эмпирической формуле С. А. Гиршкана

$$\beta = 3\sqrt[4]{Q} - m$$

или по нижеприведенным значениям

m	1,0	1,5	2,0	2,5
β	0,8...3	0,6...3,1	0,5...3,4	0,4...3,8

При $m>2,5$ β назначают по расчету или по данным аналогов.

Удельная энергия сечения e (рис. 6.5) — механическая энергия единицы массы жидкости, протекающей через живое сечение в единицу времени от-

6.8. Элементы живого сечения каналов различной формы

Элементы живого сечения	Трапецеидальной (см. рис. 6.4, *а*)	Параболической (квадратичная парабола) $x^2=2py$ (см. рис. 6.4, *б*)	Круговой (сегментной) (см. рис. 6.4, *г*)
Ширина поверху	$B=b+2mh=h(\beta+2m)$	$B=2\sqrt{2ph}=2\sqrt{2\tau}\,p=\frac{2\sqrt{2}}{\sqrt{\tau}}h$	$B=2\sqrt{2rh-h^2}=2r\sin\frac{\varphi}{2}$
Ширина средняя	$b_m=b+mh=h(\beta+m)$ $b_m=m(1+\sigma)R/\sigma$		
Глубина	h	h	$h=2r\sin^2\frac{\varphi}{4}$
Глубина средняя	$h_m=S/B=(\beta+m)h/(\beta+2m)$	$h_m=2h/3$	$h_m=(\varphi-\sin\varphi)r^2/4\sqrt{2hr-h^2}=$ $=r(\varphi-\sin\varphi)/4\sin(\varphi/2)$
Характеристика живого сечения безразмерная	$\sigma=mh/b=m/(\beta+m)$	$\tau=h/p$	φ
Площадь сечения	$S=(b+mh)h=(\beta+m)h^2$ $S=m(1+\sigma)^2R^2/\sigma=mh^2/\sigma$	$S=2Bh/3=4\sqrt{2p}h^{3/2}/3$ $S=4\sqrt{2}h^2/3\sqrt{\tau}=4\sqrt{2}p^2\tau^{3/2}/3$	$S=0{,}5(\varphi-\sin\varphi)r^2$
Смоченный периметр	$\chi=b+2h\sqrt{1+m^2}=$ $=h/(\beta+2\sqrt{1+m^2})$	$\chi=p\,[\sqrt{2\tau(1+2\tau)}+\ln(\sqrt{2\tau}+$ $+\sqrt{1+2\tau})]=pN(\tau)$	$\chi=\varphi r$
Гидравлический радиус	$R=(b+mh)h/(b+2h\sqrt{1+m^2})=$ $=(\beta+m)h/(\beta+2\sqrt{1+m^2})=$ $=h(1-\sigma)$	$R=4\sqrt{2}\,h^{3/2}/3\sqrt{p}\,N(\tau)=$ $=4\sqrt{2\tau}\,h/3N(\tau)=4\sqrt{2}p\tau^{3/2}/3N(\tau)$	$R=r(\varphi-\sin\varphi)/2\varphi$
Площадь сечения относительная	$\Psi=S/R^2=m(1+\sigma)^2/\sigma$	$\Psi=\sqrt{3}\,[N(\tau)]^2/4\sqrt{2}\tau^{3/2}$	$\Psi=2\varphi^2/(\varphi-\sin\varphi)$

Примечания. 1. Элементы живого сечения, используемые в формулах: b — ширина по дну, зависит от применяемых при строительстве механизмов; β — относительная ширина по дну $\beta=b/h$; m — заложение откоса, $m=\operatorname{ctg}\theta$ (θ — угол наклона откоса к горизонтали); R — гидравлический радиус канала, $R=\omega/\chi$; p — параметр квадратичной параболы; h — глубина; B — ширина поверху; r — радиус живого сечения; φ — центральный угол сечения. 2. Прямоугольное сечение русла представляет собой частный случай трапецеидального при $m=0$; треугольный профиль — частный случай трапецеидального при $b=0$. 3. Для параболических русл заложение откоса дается на урезе воды. 4. Значения функции $N(\tau)$ приведены в таблице 6.9.

6.9. Значения функции $N(\tau)$ для параболической формы живого сечения

τ	$N(\tau)$	τ	$N(\tau)$	τ	$N(\tau)$	τ	$N(\tau)$
0,001	0,09	0,15	1,15	0,55	2,44	0,95	3,48
0,005	0,20	0,20	1,34	0,60	2,58	1,00	3,61
0,01	0,28	0,25	1,54	0,65	2,71	1,05	3,72
0,02	0,40	0,30	1,71	0,70	2,83	1,10	3,84
0,04	0,57	0,35	1,85	0,75	2,97	1,15	3,97
0,08	0,82	0,45	2,16	0,85	3,23	1,25	4,19
0,10	0,93	0,50	2,30	0,90	3,34		

носительно горизонтальной плоскости, проходящей через наинизшую точку данного живого сечения,

$$e = h + \alpha v^2/2g, \qquad (6.1)$$

где h — наибольшая глубина воды в живом сечении; v — скорость потока; α — коэффициент учета кинетической энергии, обычно равный 1,1.

Критическая глубина h_{cr} — глубина, при которой поток с заданным расходом воды имеет минимальную удельную энергию сечения. Соответствующее состояние потока называют критическим. Экстремальная точка $h=h_{cr}$ на графике удельной энергии сечения в зависимости от глубины наполнения (см. рис. 6.5) делит кривую на две части, соответствующие различным состояниям потока:

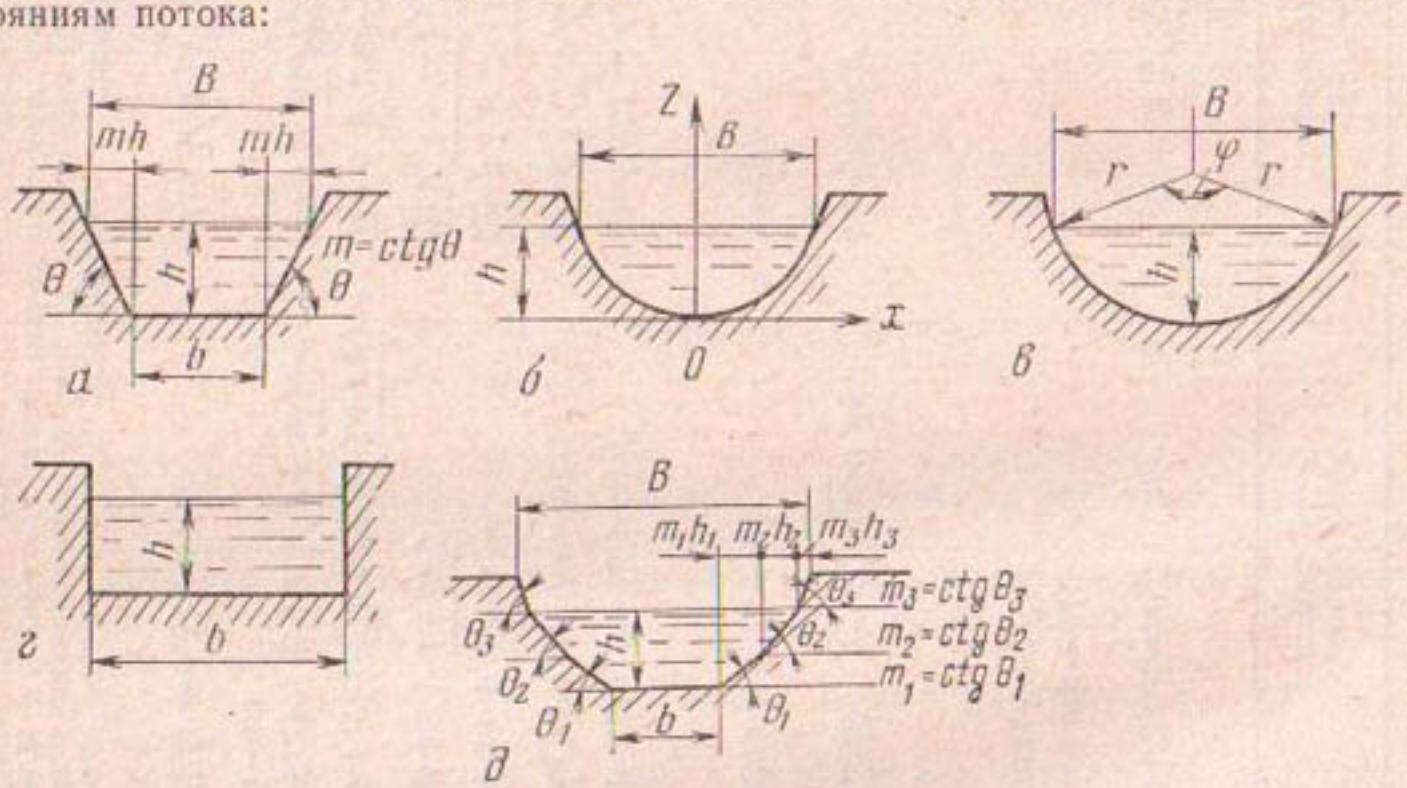


Рис. 6.4. Формы и размеры живого сечения каналов:
а — трапецеидальная; *б* — параболическая; *в* — круговая (сегментная); *г* — прямоугольная; *д* — полигональная

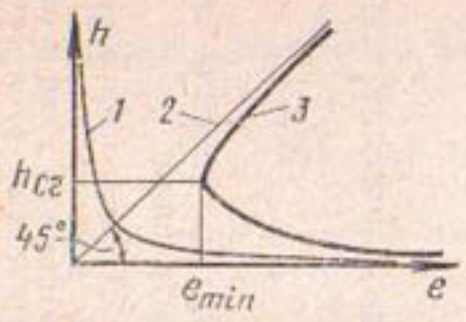


Рис. 6.5. График удельной энергии сечения e в зависимости от глубины водного потока h:
1 — удельная кинетическая энергия, $e_v=\alpha v^2/2g$; *2* — удельная потенциальная энергия, $e_h=h$; *3* — удельная энергия сечения, $e=h+\alpha v^2/2g$

спокойное состояние, при котором $h>h_{cr}$ удельная энергия сечения возрастает с увеличением глубины;

бурное состояние потока, при котором $h<h_{cr}$ удельная энергия сечения уменьшается с ростом глубин.

Критическую глубину потока определяют подбором из уравнения

$$S^3_{cr}/B_{cr} = \alpha Q^2/g, \qquad (6.2)$$

где S_{cr}, B_{cr} — соответственно площадь и ширина по верху живого сечения, соответствующая критической глубине; Q — расход воды в канале.

Критическую глубину канала определяют по формулам:

прямоугольной формы $h_{crf} = \sqrt[3]{\alpha Q^2/gb^2}$;

трапецеидальной » $h_{cr} = kh_{crf}$;

параболической » $h_{crp} = \sqrt[4]{27\alpha Q^2/64gp}$,

где k — коэффициент условного приведения трапецеидального русла к прямоугольному с тем же расходом Q и шириной по дну b, принимают по таблице 6.10 в зависимости от mh_{crf}/b; p — параметр квадратичной параболы.

6.10. Значения коэффициента $k=h_{cr}/h_{crf}$ для расчетов критических глубин в трапецеидальных руслах

$\frac{mh_{cr\,f}}{b}$	k	$\frac{mh_{cr\,f}}{b}$	k	$\frac{mh_{cr\,f}}{b}$	k	$\frac{mh_{cr\,f}}{b}$	k
0,005	0,998	0,2	0,937	0,4	0,884	0,8	0,802
01	997	21	934	42	878	82	799
02	993	22	931	44	874	84	796
03	990	23	928	46	869	86	793
04	987	24	925	46	865	88	789
05	983	25	922	50	860	90	786
06	980	26	919	52	856	92	783
07	976	27	917	54	852	94	780
08	973	28	914	56	848	96	777
09	970	29	911	58	844	98	774
0,1	0,967	0,3	0,909	0,6	0,839	1	0,771
11	964	31	906	62	835	05	764
12	961	32	903	64	831	10	757
13	958	33	900	66	827	15	750
14	955	34	898	68	823	20	744
15	952	35	886	70	820	25	737
16	949	36	893	72	816	30	731
17	946	37	890	74	812	35	725
18	943	38	888	74	809	40	719
19	940	39	886	78	806	50	707

Уклон канала назначают из условия обеспечения средних скоростей потока v_m в пределах

$$v_s < v_m < v_{adm}, \qquad (6.3)$$

где v_s — допускаемая незаиляющая скорость; v_{adm} — допускаемая неразмывающая скорость воды.

Критический уклон русла, при котором глубина потока при равномерном движении с заданным расходом равна критической, вычисляют по формуле

$$i_{cr} = g\chi_{cr}/\alpha C^2_{cr} B_{cr}, \qquad (6.4)$$

где C_{cr} — коэффициент Шези для канала с критической глубиной; χ_{cr} — смоченный периметр канала при h_{cr}. Для достаточно широких русл ($B/h>10$)

$\chi_{cr} \approx B_{cr}$ и $i_{cr} = g/\alpha C^2_{cr}$ Критические уклоны русл для различных коэффициентов Шези при $\alpha = 1{,}1$ приведены ниже.

C, м^{0,5}/с	15	20	30	40	50	60	70	80
i_{cr}	0,03964	0,02229	0,00991	0,00557	0,00357	0,00248	0,00182	0,00139

6.3.2. ДОПУСКАЕМЫЕ СКОРОСТИ ПОТОКА В КАНАЛАХ

Допускаемая неразмывающая скорость потока — наибольшая при равномерном движении воды средняя скорость, при которой не происходит размыв грунтового русла.

Различают допускаемую среднюю скорость потока v_{adm} и допускаемую среднюю донную скорость $v_{\Delta adm}$ — скорость на высоте выступов шероховатости Δ, для однородных грунтов $\Delta = 0{,}7\,d_m$, для неоднородных — $\Delta = 0{,}7\,d_{95}$, где d_m — средний размер частиц связного или агрегатов глинистого грунта;

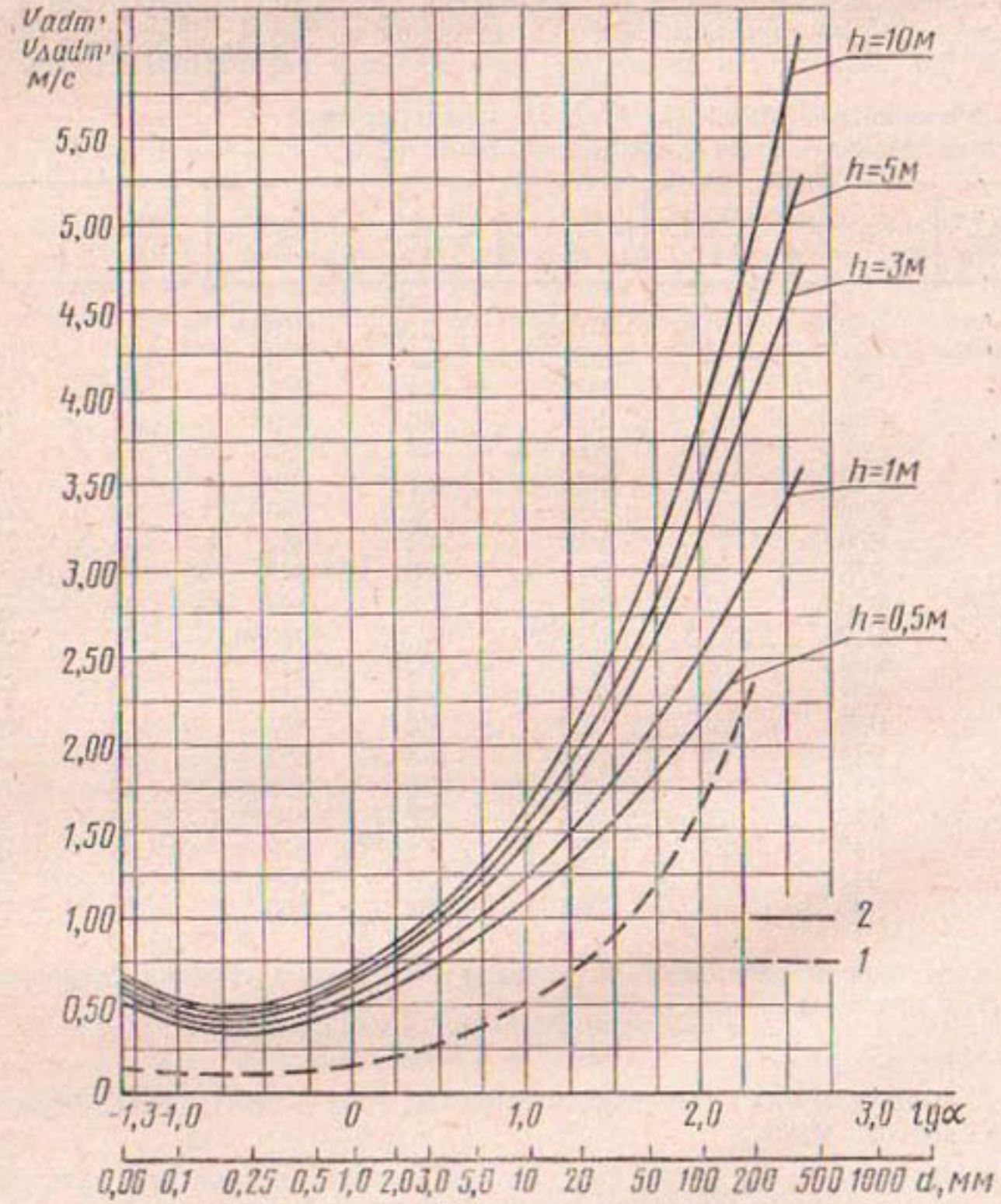


Рис. 6.6. Допускаемые средние и донные скорости в зависимости от глубины потока и диаметра частиц грунта, слагающего русло канала:

1 — $v_{\Delta adm}$; *2* — v_{adm} при различных h

d_{95} — средний размер частиц, меньше которых в данном грунте содержится по массе 95%. Ориентировочные значения допускаемых скоростей в зависимости от диаметра грунтовых частиц и глубины потока приведены на рисунке 6.6.

Для несвязных однородных грунтов ($d_{95}/d_5 \leqslant 5$)

$$v_{adm} = \lg(8{,}8h/d_m)\sqrt{\gamma_c[g(\rho-\rho_w)d_m + 2c_{yn}k_c]/(0{,}22\rho_w\gamma_v)}; \quad (6.5)$$

$$v_{\Delta adm} = 1{,}25\sqrt{\gamma_c[g(\rho-\rho_w)d_m + 2c_{yn}k_c]/(0{,}22\rho_w\gamma_v)}, \quad (6.6)$$

где c_{yn} — усталостная прочность на разрыв, учитывающая появление ощутимых сил сцепления при мелкозернистости грунта ($d<0{,}25$ мм), для несвязного грунта приближенно $c_{yn}=1{,}72\cdot10^{-4}/d_m$ (d_m в м), Па; k_c — коэффициент отклонения сил сцепления от среднего значения, обычно $k_c=0{,}5$; γ_c — коэффициент условий работы, учитывающий влияние наносов в коллоидном состоянии на размывающую способность потока (табл. 6.11); γ_v — коэффициент перегрузки под влиянием пульсационного характера скоростей и других случаев изменения размывающей способности потока $\gamma_v=(v_{\Delta max}/v\Delta m)^2$, $v_{\Delta max}$ и $v_{\Delta m}$ — соответственно максимальная мгновенная и осредненная (по времени) донные скорости. При $d_m<0{,}01$ м приближенно

$$\gamma_v = 1 + d_m/(0{,}00005 + 0{,}3d_m). \quad (6.7)$$

При отсутствии данных для потоков с вполне развившейся турбулентностью $\gamma_v=4$.

Для несвязных неоднородных грунтов допускаемую неразмывающую скорость определяют для среднего диаметра частиц естественной самоотмостки $D_{отм}$ (рис. 6.7), возникающей при размыве русла канала в начальный

6.11. Коэффициент условий работы каналов γ_c в связных и несвязных грунтах при содержании в потоке глинистых частиц 0,1 кг/м³ и более

Грунт русла	Для магистральных каналов	Для распределителей старших порядков	Для распределителей младших порядков
Песок			
мелкий и средней крупности	1,3	1,4	1,5
крупный и гравелистый	1,5	1,6	1,7
Гравий:			
мелкий	1,5	1,6	1,7
средний	1,4	1,5	1,6
крупный	1,1	1,3	1,4
Галька	1,1	1,2	1,3
Глинистые грунты:			
при наличии наносов	1,3	1,4	1,6
при наличии донных коррозирующих наносов	0,75	0,8	0,85
Дно и откосы покрыты растительностью	1,1	1,15	1,2
При длительных перерывах работы каналов:			
для районов недостаточного увлажнения	0,2	0,22	0,25
для районов с влажным климатом	0,6	0,7	0,8

Примечания. 1. К районам недостаточного увлажнения относят территорию, расположенную между изолиниями 0 и 0,5 л/с с 1 км² на картах изолиний годового стока СССР. 2. Перерыв работы считают длительным, если происходит пересыхание грунта, снижающее сопротивление размыву. 3. При содержании глинистых частиц в потоке менее 0,1 кг/м³ $\gamma_c=1$.

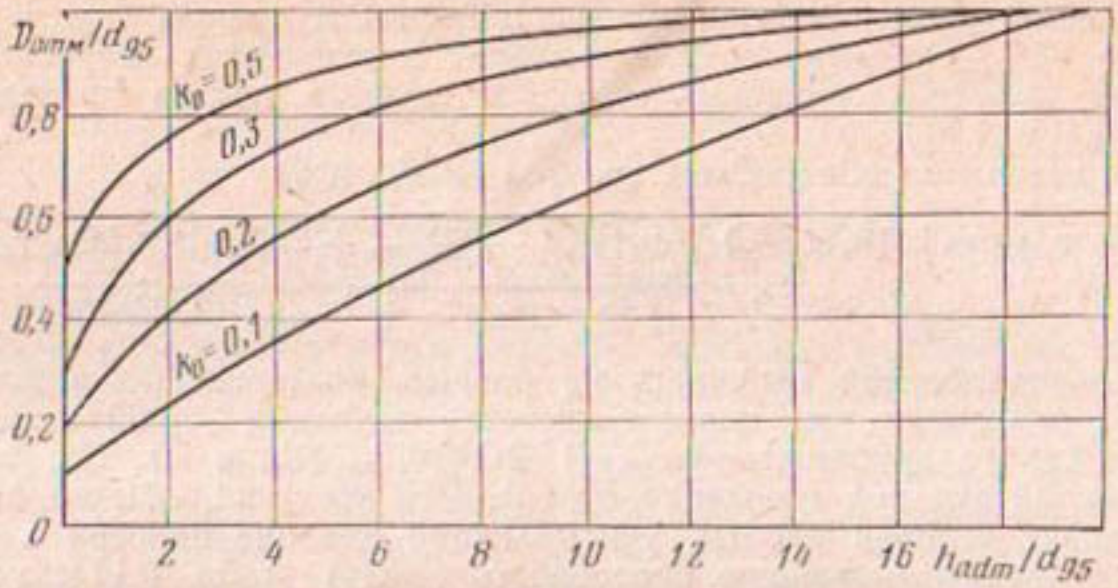


Рис. 6.7. Зависимость среднего диаметра частиц самоотмостки $D_{отм}$ от допустимой глубины размыва h_{adm}: $C_m = d_m/d_{95}$ — коэффициент однородности исходного грунта

период его эксплуатации. Допускаемую глубину размыва при этом ограничивают 5% от глубины потока h: $h_{adm} \leqslant 0{,}05\,h$.

Для связных грунтов

$$v_{adm} = \lg(8{,}8h/d_m)\sqrt{\gamma_c[g(\rho-\rho_w)d_m + 1{,}25c_{yn}k_c]/(1{,}3\rho_w\gamma_v)}; \quad (6.8)$$

$$v_{\Delta adm} = 1{,}25\sqrt{\gamma_c[g(\rho-\rho_w)d_m + 1{,}25c_{yn}k_c]/(1{,}3\rho_w\gamma_v)}, \quad (6.9)$$

где c_{yn} — нормативная усталостная прочность грунта для связных грунтов, Па, $c_{yn} = 0{,}35\,c_n$, где c_n — нормативное удельное сцепление поверхностного

6.12. Допускаемые неразмывающие скорости потока для однородных несвязных грунтов ($\rho = 2650$ кг/м³, $\gamma_c = 1$), м/с

Средний размер частиц грунта d, мм	Донные скорости на высоте выступов шероховатости $v_{\Delta adm}$, м/с	Средние скорости v_{adm} при глубине потока h, м			
		0,5	1	3	5
0,05	0,13	0,52	0,55	0,60	0,62
0,15	0,10	0,36	0,38	0,42	0,44
0,25	0,11	0,37	0,39	0,41	0,45
0,37	0,12	0,38	0,41	0,46	0,48
0,50	0,13	0,41	0,44	0,50	0,52
0,75	0,16	0,47	0,51	0,57	0,59
1	0,17	0,51	0,55	0,62	0,65
2	0,24	0,64	0,70	0,79	0,83
2,5	0,27	0,69	0,75	0,86	0,90
3	0,29	0,73	0,80	0,91	0,96
5	0,37	0,87	0,96	1,10	1,17
10	0,52	1,10	1,23	1,42	1,51
15	0,64	1,26	1,42	1,65	1,76
20	0,73	1,37	1,55	1,84	1,96
25	0,82	1,48	1,65	1,98	2,12
30	0,89	1,56	1,76	2,10	2,26
40	1,03	1,68	1,93	2,32	2,50
75	1,42	2,01	2,35	2,89	3,14
100	1,63	2,15	2,54	3,14	3,46
150	2,00	2,35	2,84	3,62	3,96
200	2,31	2,47	3,03	3,92	4,31
300	2,82	2,90	3,32	4,40	4,94

6.13. Допускаемые неразмывающие скорости потока для неоднородных несвязных грунтов при глубине размыва $h_{adm} \leqslant 0{,}05\,h$ (при $c_{m,95} \geqslant 0{,}6$ грунт однороден; $\rho = 2650$ кг/м³, $\gamma_c = 1$), м/с

Средний размер частиц грунта d, мм	$c_{m,95}=0{,}5$				$c_{m,95}=0{,}3$				$c_{m,95}=0{,}2$				$c_{m,95}=0{,}15$			
	глубина потока, м															
	0,5	1	3	5	0,5	1	3	5	0,5	1	3	5	0,5	1	3	5
0,25	0,44	0,47	0,52	0,55	0,53	0,58	0,64	0,68	0,62	0,67	0,76	0,80	0,65	0,75	0,85	0,89
0,37	0,48	0,52	0,58	0,61	0,59	0,64	0,72	0,75	0,65	0,75	0,84	0,89	0,66	0,83	0,94	1,00
0,50	0,53	0,57	0,64	0,67	0,63	0,70	0,79	0,83	0,67	0,81	0,92	0,97	0,66	0,86	1,03	1,09
0,75	0,59	0,65	0,73	0,77	0,68	0,79	0,89	0,94	0,70	0,87	1,05	1,11	0,66	0,86	1,17	1,24
1	0,63	0,70	0,79	0,83	0,71	0,83	0,96	1,02	0,73	0,89	1,13	1,20	0,66	0,87	1,26	1,34
2	0,79	0,89	1,04	1,10	0,83	1,01	1,26	1,34	0,76	0,99	1,41	1,56	0,70	0,93	1,44	1,72
2,5	0,84	0,96	1,13	1,20	0,87	1,06	1,36	1,46	0,78	1,02	1,43	1,70	0,71	0,94	1,48	1,79
3	0,88	1,02	1,21	1,28	0,90	1,11	1,44	1,56	0,80	1,04	1,54	1,78	0,73	0,96	1,51	1,84
5	1,01	1,18	1,45	1,56	0,98	1,23	1,67	1,86	0,86	1,11	1,68	1,98	0,78	1,01	1,58	1,95
10	1,18	1,42	1,82	2,00	1,00	1,38	1,97	2,26	0,95	1,21	1,83	2,22	0,86	1,10	1,67	2,07
15	1,29	1,57	2,05	2,28	1,17	1,48	2,13	2,48	1,02	1,29	1,92	2,34	0,93	1,17	1,74	2,14
20	1,38	1,68	2,22	2,48	1,23	1,55	2,24	2,64	1,07	1,35	1,99	2,42	0,98	1,23	1,80	2,20
25	1,44	1,76	2,36	2,65	1,28	1,61	2,33	2,75	1,11	1,40	2,05	2,48	1,01	1,27	1,85	2,25
30	1,50	1,83	2,47	2,79	1,32	1,66	2,40	2,84	1,15	1,44	2,10	2,54	1,04	1,31	1,90	2,30
40	1,59	1,95	2,64	3,01	1,39	1,74	2,52	2,99	1,20	1,52	2,19	2,63	1,07	1,38	1,99	2,38
75	1,79	2,22	3,05	3,51	1,51	1,94	2,79	3,31	1,28	1,68	2,43	2,88	1,13	1,51	2,20	2,62
100	1,87	2,35	3,24	3,75	1,56	2,02	2,93	3,48	1,30	1,74	2,55	3,02	—	—	—	—
150	1,98	2,52	3,54	4,09	1,60	2,14	3,14	3,71	—	—	—	—	—	—	—	—

6.14. Допускаемые неразмывающие скорости потока для связных грунтов при содержании легкорастворимых солей менее 0,2% массы грунта ($\rho=2650$ кг/м³, $\gamma_c=1$), м/с

Расчетное удельное сцепление c, 10^5 Па	Донные скорости на высоте выступов шероховатости $v_{\Delta\,adm}$, м/с	Средние скорости v_{adm} при глубине потока, м				Расчетное удельное сцепление c, 10^5 Па	Донные скорости на высоте выступов шероховатости $v_{\Delta\,adm}$, м/с	Средние скорости v_{adm} при глубине потока, м			
		0,5	1	3	5			0,5	1	3	5
0,005	0,16	0,39	0,43	0,49	0,52	0,175	0,50	1,21	1,33	1,52	1,60
0,01	0,18	0,44	0,48	0,55	0,58	0,20	0,53	1,28	1,40	1,60	1,69
0,02	0,21	0,52	0,57	0,65	0,69	0,225	0,56	1,36	1,48	1,70	1,80
0,03	0,24	0,59	0,64	0,74	0,78	0,25	0,58	1,42	1,55	1,78	1,88
0,04	0,27	0,65	0,71	0,81	0,86	0,30	0,63	1,54	1,69	1,94	2,04
0,05	0,29	0,71	0,77	0,89	0,98	0,35	0,69	1,67	1,83	2,09	2,21
0,075	0,34	0,83	0,91	1,04	1,10	0,40	0,74	1,79	1,96	2,25	2,38
0,10	0,39	0,96	1,04	1,20	1,27	0,45	0,77	1,88	2,06	2,35	2,49
0,125	0,42	1,03	1,13	1,30	1,37	0,50	0,82	1,99	2,17	2,50	2,63
0,15	0,46	1,13	1,23	1,41	1,49	0,60	0,89	2,16	2,38	2,72	2,83

6.15. Допускаемые неразмывающие скорости потока для соленых связных грунтов при содержании легкорастворимых солей 0,2...3% массы грунта ($\rho=2650$ кг/м³, $\gamma_c=1$), м/с

Расчетное сцепление c, 10^5 Па	Глубина потока, м				Расчетное сцепление c, 10^5 Па	Глубина потока, м			
	0,5	1	3	5		0,5	1	3	5
0,005	0,36	0,40	0,46	0,49	0,175	0,70	0,77	0,89	0,94
0,01	0,39	0,43	0,49	0,52	0,20	0,75	0,82	0,93	1,00
0,02	0,41	0,45	0,52	0,55	0,225	0,80	0,88	1,00	1,07
0,03	0,43	0,48	0,55	0,59	0,25	0,82	0,91	1,04	1,10
0,04	0,46	0,51	0,58	0,62	0,30	0,90	0,99	1,12	1,20
0,05	0,48	0,53	0,61	0,65	0,35	0,97	1,06	1,22	1,30
0,075	0,51	0,56	0,64	0,69	0,40	1,03	1,15	1,31	1,40
0,10	0,55	0,61	0,70	0,75	0,45	1,09	1,20	1,39	1,46
0,125	0,60	0,67	0,76	0,81	0,50	1,26	1,28	1,46	1,56
0,15	0,65	0,72	0,82	0,88	0,60	1,27	1,38	1,60	1,70

Примечание. При содержании легкорастворимых солей более 3% v_{adm} устанавливают специальными исследованиями.

слоя грунта в русле канала (см. табл. 1.11); γ_c — коэффициент работы, определяемый по таблице 6.11.

Для каналов в земляном русле (плотность грунта 2650 кг/м³, $\gamma_c=1$) и с грунтопленочным экраном при расходах до 50 м³/с допускаемые неразмывающие скорости даны в таблицах 6.12...6.16.

При плотности грунта отличной от 2650 кг/м³ и $\gamma_c\neq1$ допускаемые неразмывающие скорости определяют умножением значений, приведенных в таблицах 6.12...6.16, на коэффициент $\sqrt[7]{(\rho-1000)/1650}\sqrt{\gamma_c}$.

Расчетное удельное сцепление c в таблицах 6.14, 6.15 вычисляют как произведение коэффициента однородности грунта $c_{m,95}=d_m/d_{95}$ на нормативное удельное сцепление c_n, которое определяют лабораторными испытаниями. Для распределителей низших порядков, каналов водосборно-сбросной и коллекторно-дренажной сети при отсутствии данных c_n находят по таблицам 1.10, 1.11.

6.16. Допускающие неразмывающие скорости потока для торфа при гидравлическом радиусе русла канала $R=1$ м

Вид торфа	v_{adm}, м/с
Древесный	0,4
Хвощевой	0,8
Осоково-гипновый, хорошо разложившийся (более 55%)	0,6
Осоково-гипновый, слабо разложившийся (до 35%)	0,9
Сфагновый, хорошо разложившийся (более 55%)	0,7
Сфагновый, слабо разложившийся (до 35%)	1,2
Сфагновый пушицевый, слабо разложившийся (до 35%)	1,5

Примечание. Для других R приведенные значения v_{adm} умножают на $R^{0,55}$.

Коэффициент однородности глинистого грунта определяют по формуле

$$c_{m,95} = 1 - \alpha\sigma/c_n, \qquad (6.10)$$

где α — коэффициент вероятности минимального сцепления, для магистральных каналов $\alpha=2{,}65$, для распределителей первого порядка — 2,5, для распределителей последующих порядков — 2; σ — стандарт кривой распределения (средняя квадратичная ошибка).

Допускаемые средние скорости для каналов в облицовках приведены в таблице 6.17. Для каналов в земляном русле и с грунтопленочным экраном при расходах более 50 м³/с принимают по аналогам или проводят специальные исследования.

6.17. Допускаемые средние скорости потока для каналов с монолитными бетонными, сборными железобетонными и асфальтобетонными облицовками, м/с

Проектная марка (класс) материала облицовки по прочности	Глубина потока, м			
	0,5	1	3	5
50(В3,5)	9,6	10,6	12,3	13,0
75(В5)	11,2	12,4	14,3	15,2
100(В7,5)	12,5	13,8	16,0	17,0
150(В10)	14,0	15,6	18,0	19,1
200(В15)	15,6	17,3	20,0	21,2
300(В22,5)	19,2	21,2	24,6	26,1

Допускаемая незаиляющая скорость v_s — минимальная средняя скорость потока, не допускающая заиления и зарастания каналов, часто ее принимают равной

$$v_s = 0{,}3R^{0,25}, \qquad (6.11)$$

где R — гидравлический радиус.

Для более точного учета крупности заиляющих частиц используют формулу

$$v_s = AQ^{0,2}, \qquad (6.12)$$

где A — эмпирический коэффициент, зависящий от средневзвешенной гидравлической крупности наносов w_m, мм/с; $A=0{,}33$ для $w_m<1{,}5$ мм/с, 0,44 — для $w_m=1{,}5...3{,}5$ мм/с и 0,55 — для $w_m>3{,}5$ мм/с.

Другим критерием незаиляемости каналов служит транспортирующая способность потока ρ_t, г/см³, которую определяют по формулам

$$\rho_t = 700\,(v/w)^{3/2}\sqrt{Ri} \quad \text{при} \quad 2 \text{ мм/с} < w < 8 \text{ мм/с};$$
$$\rho_t = 350v\sqrt{Riv/w} \quad \text{при} \quad 0{,}4 \text{ мм/с} < w < 2 \text{ мм/с}, \qquad (6.13)$$

6.18. Гидравлическая крупность частиц, мм/с

d_m, мм	w	d_m, мм	w	d_m, мм	w
0,005	0,0175	0,06	2,49	0,150	15,6
0,01	0,0692	0,07	3,39	0,175	18,9
0,02	0,277	0,08	4,43	0,20	21,6
0,03	0,623	0,09	5,61	0,225	24,3
0,04	1,11	0,10	6,92	0,25	27,0
0,05	1,73	0,125	10,81	0,275	29,9

где w — гидравлическая крупность частиц среднего диаметра, принимаемая по таблице 6.18; i — уклон дна канала.

При скорости воды в каналах более 2 м/с поступление наносов с диаметром частиц более 0,25 мм обычно ограничивают.

6.3.3. УСТАНОВИВШЕЕСЯ ДВИЖЕНИЕ ВОДЫ В КАНАЛАХ

Установившееся движение — это движение воды в открытых руслах, при котором отсутствуют изменения основных параметров потока по времени. Различают равномерное и неравномерное установившееся движение.

Равномерное движение в каналах — это безнапорное движение с постоянными по длине потока скоростями и гидравлическими элементами. Оно характеризуется параллельностью и прямолинейностью линий тока, являющихся в этом случае траекториями движения частиц воды.

Расход и среднюю скорость водного потока определяют по формулам

$$v_m = C\sqrt{Ri}; \qquad (6.14)$$

$$Q = SC\sqrt{Ri}, \qquad (6.15)$$

где S — площадь живого сечения потока; i — уклон дна канала.

Коэффициент Шези C для мелиоративных каналов с гидравлическим радиусом $R<5$ м равен

$$C = R^y/n \quad \text{или} \quad C = 1/n + (27{,}5 - 300n)\lg R,$$

где y — эмпирический показатель степени, $y=2{,}5\sqrt{n} - 0{,}13-0{,}75\ (\sqrt{n}-0{,}1)$; n определяют по таблицам 6.19...6.21.

Для приближенных расчетов используют формулу

$$C = R^{1/6}/n. \qquad (6.16)$$

Для расчета каналов с равномерным движением потока разработаны методы: допускаемых скоростей, влекущей силы, режимной теории, морфометрических зависимостей, комбинированные.

В нашей стране в большинстве случаев применяют метод допускаемых скоростей, согласно которому средняя скорость движения потока не должна превышать среднюю допускаемую (неразмывающую) скорость и быть не меньше средней незаиляющей скорости [см. формулу (6.3)].

Основные типы задач гидравлического расчета при равномерном установившемся течении приведены в таблице 6.22.

Задачи типов I...IV решают с помощью формул (6.14), (6.15) с учетом соотношений таблицы 6.5 непосредственно или подбором. Разработаны специальные способы решения с использованием таблиц и номограмм, которые приведены в справочниках и учебниках по гидравлике.

Особенности гидравлического расчета крупных каналов в легкоразмываемых грунтах. Крупным устойчивым каналом считают канал с расходом воды более 20...300 м³/с, в котором очертание поперечного сечения и поло-

6.19. Коэффициенты шероховатости каналов в земляном русле

Характеристика каналов	Оросительные	Коллекторно-дренажные и осушительные
С расходом воды свыше 25 м³/с в грунтах:		
связных и песчаных	0,020	0,025
гравелисто-галечниковых	0,0225	0,0275
С расходом воды 25...1 м³/с в грунтах:		
связных и песчаных	0,0225	0,030
гравелисто-галечниковых	0,025	0,0325
С расходом воды менее 1 м³/с	0,025	0,035
Постоянная сеть периодического действия	0,0275	—
Оросители	0,030	—

Примечания. 1. Для каналов водосборно-сбросной сети значение коэффициента шероховатости n повышают на 10% по сравнению с указанным в таблице для оросительных каналов и округляют до ближайшего общепринятого значения. 2. Для каналов, выполняемых взрывным способом, значение n повышают на 10...20% в зависимости от размеров принимаемой доработки их сечений.

6.20. Коэффициенты шероховатости каналов в скале

Характеристика поверхности ложа канала	n
Хорошо обработанная	0,2...0,025
Посредственно обработанная:	
без выступов	0,03...0,035
с выступами	0,04...0,045

6.21. Коэффициенты шероховатости каналов с облицовкой

Облицовка	n
Бетонная:	
хорошо отделанная	0,012...0,014
грубая	0,015...0,017
Сборные железобетонные лотки	0,012...0,015
Покрытие из асфальтобитумных материалов	0,013...0,016
Одернованное русло	0,030...0,035

жение русла в плане практически не изменяются. Наличие грядового рельефа не исключают.

Задача гидравлического расчета: заданы — расход Q, м³/с, и средний диаметр песчаных фракций грунта d_m, м, необходимо определить размеры живого сечения (глубины, ширины, площади) и гидравлический уклон земляного канала с осветленной водой ($\rho<0{,}5$ кг/м³), прокладываемого в легкоразмываемых однородных грунтах, при равномерном течении потока (рис. 6.8).

Для расчета используют комбинированный метод допускаемых скоростей и морфометрических зависимостей. Параметр формы живого сечения или относительную ширину потока определяют по морфометрическому соотношению

$$B/h_m = a_y \left(Q/d^2{}_m \sqrt{g d_m}\right)^{1/8}, \qquad (6.17)$$

где a_y — кинематико-морфологический параметр, характеризующий устойчивость русла и зависящий от отношения v/v_{adm}.

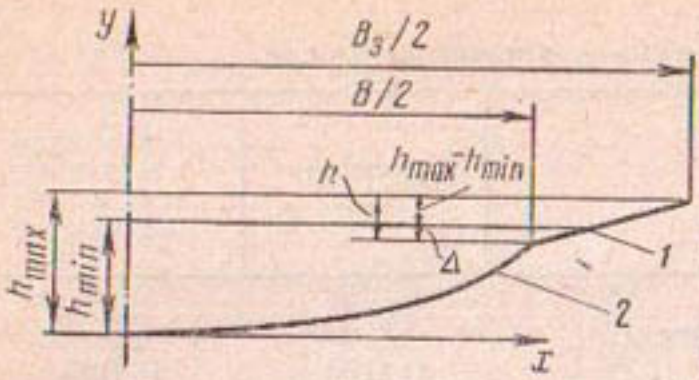


Рис. 6.8. Расчетная схема поперечного сечения крупного земляного канала:

1 — пляжный откос (m=8...12); *2* — парабола: $y=h_{max}(2x/B)^n$

Значения B/h_m, рассчитанные по формуле (6.17) при $v/v_{adm}=1$, даны в таблице 6.23.

Сечение канала в легкоразмываемых грунтах принимают параболическим: $y=h_{max}(2x/B)^n$, где n — степень параболы.

Соотношение максимальной и средней глубины потока h_{max}/h_m или параметр неравномерности глубины в живом сечении для параболической формы русла составляет 1,7...1,2.

Ширину канала по урезу воды после нескольких лет эксплуатации в расчетном режиме определяют по формуле

$$B_э = B + 2m_{по}h_{по}, \qquad (6.18)$$

где $m_{по}$ — заложение пляжного откоса ($m_{по}$=8...12); $h_{по}$ — глубина воды в конце пляжного откоса, $h_{по}=h_{max}-h_{min}+\Delta$ [h_{max}, h_{min} — максимальная и минимальная глубины потока, м; Δ — заглубление под минимальный уровень воды (не менее 0,5 м)].

6.22. Основные типы задач гидравлического расчета при установившемся течении потока

Тип	Исходные данные	Определяемые величины
I	i, n, размеры сечения: b, h для трапецеидального, p и h для параболического	Q и v_m
II	Q, n, i, m (для трапеции), один из элементов живого сечения (b или h для трапеции, p или h для параболы)	Второй элемент живого сечения: b при известном h (или наоборот); p при известном h (и наоборот) и среднюю скорость v_m
III	Q, n, i, m (для трапеции)	Размеры сечения b и h для трапеции, p и h для параболы, среднюю скорость v_m
IV	Q, v_m, n, i, m (для трапеции)	Размеры сечения b и h или p и h

Гидравлический уклон вычисляют по формуле (6.15). Для определения коэффициента Шези C предложена зависимость, не содержащая коэффициента шероховатости,

$$C/\sqrt{g} = \sqrt{0{,}2\,(B/h_m)^2 + 43}. \qquad (6.19)$$

Значения коэффициента Шези C для диапазона расходов от 200 до 2400 м³/с, рассчитанные по формуле (6.19), приведены в таблице 6.24.

Пример расчета. Определить гидравлические параметры канала при заданном расходе воды Q=1000 м³/с и среднем диаметре частиц грунта d_m= =0,25 мм. Сечение канала считать в виде квадратичной параболы, поток — осветленным.

Значение параметра формы живого сечения при $v/v_{adm}=1$ по таблице 6.23 B/h_m=27,5. Назначают предварительную среднюю скорость потока v=0,6 м/с и определяют соответствующие ей параметры живого сечения канала $S=Q/v$=1667 м²; $h_m=\sqrt{S/(B/h_m)}\approx 7{,}8$ м; h_{max}=1,5; h_m=11,7 м; B= $=S/h_m$=214 м.

6.23. Параметр формы живого сечения крупного канала при $v/v_{adm}=1$

Q, м³/с	d_m, мм				
	0,15	0,20	0,25	0,30	0,35
200	26,3	24,1	22,4	21,2	20,2
300	27,7	25,3	23,6	22,3	21,3
400	28,7	26,3	24,5	23,1	22,0
500	29,5	27,0	25,2	23,8	22,7
600	30,2	27,6	25,8	24,3	23,2
700	30,8	28,2	26,3	24,8	23,6
800	31,3	28,6	26,7	25,2	24,0
900	31,8	29,1	27,1	25,6	24,4
1000	32,2	29,4	27,5	26,0	24,7
1250	33,1	30,3	28,2	26,7	25,4
2000	35,1	32,1	29,9	28,9	27,0
2400	35,9	32,8	30,6	29,5	27,6

6.24. Коэффициент Шези C для крупных каналов

Q, м³/с	d_m, мм				
	0,15	0,20	0,25	0,30	0,35
200	42,4	39,8	37,7	36,3	35,2
300	44,3	41,2	39,2	37,6	36,5
400	45,4	42,3	40,3	38,6	37,3
500	46,4	43,3	41,1	39,3	38,1
600	47,3	44,1	41,8	40,0	38,7
700	48,1	44,7	42,4	40,6	39,2
800	48,7	45,3	43,0	41,1	39,6
900	49,4	45,8	43,4	41,6	40,1
1000	49,9	46,3	43,9	42,0	40,5
1250	51,0	47,5	44,8	43,0	41,4
2000	53,6	49,8	47,0	44,9	43,3
2400	54,7	50,7	47,8	45,7	44,1

Допускаемая неразмывающая скорость v_{adm} при $h=1$ м и $d_m=0{,}25$ мм по таблице 6.11 равна 0,39 м/с. Тогда в канале с h_{max}: $v_{adm,h}=v_{adm}h^{1/4}=$ $=0{,}72$ м/с.

Средняя допускаемая скорость течения

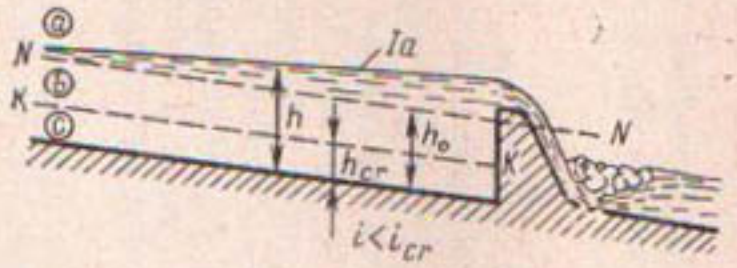
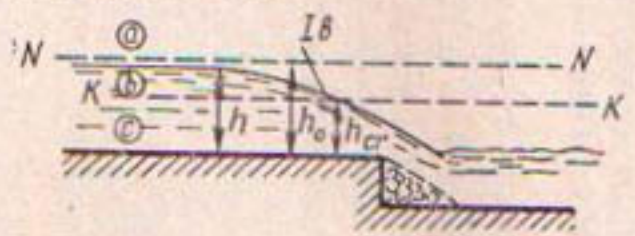
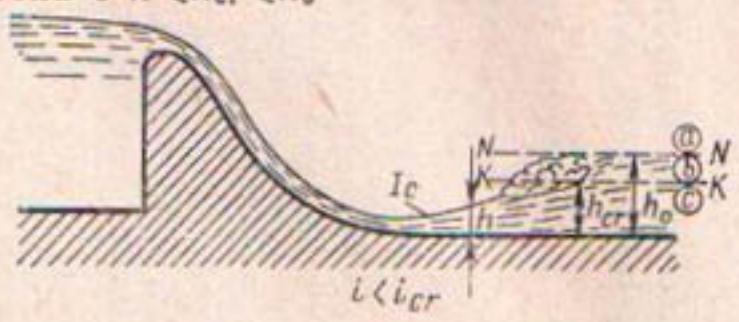
$$v_{adm,m}=v_{adm}/1{,}1=0{,}72/1{,}1=0{,}65 \text{ м/с}.$$

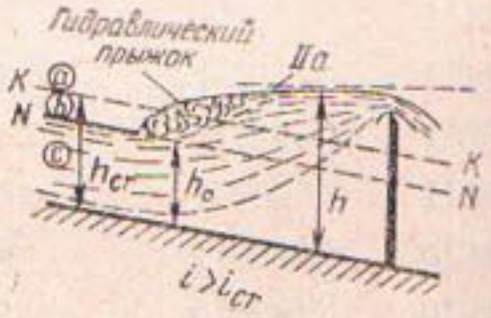
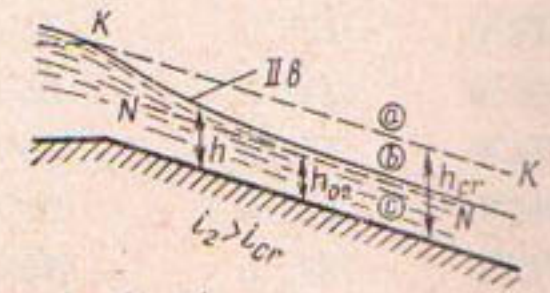
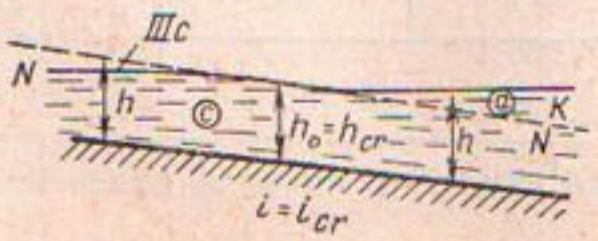
Для новой скорости уточняют поперечные размеры канала: $S=1538$ м², $h_m=7{,}5$ м, $B=206$ м и определяют гидравлический уклон при $C=43{,}9$ м/с, определенном по таблице 6.24: $i=0{,}65^2/(43{,}9\cdot 7{,}5)=0{,}000029$.

Неравномерное установившееся движение воды в каналах характеризуется переменными по длине потока средними скоростями и площадями живых сечений. Наибольший практический интерес представляет плавно изменяющееся движение, при котором форма и площади живых сечений изменяются по длине настолько плавно, что линии тока можно считать примерно параллельными.

Дифференциальные уравнения установившегося плавно изменяющегося движения воды в призматических руслах, наиболее распространенных в ме-

6.25. Формы кривых свободной поверхности плавно изменяющихся потоков

Зона расположения и схема	Тип и асимптоты	Область появления
	Спокойный поток $i<i_{cr}$; $h_0>h_{cr}$	
Зона а $h>h_0>h_{cr}$ 	Ia — вогнутая кривая подпора; верхняя асимптота — линия нормальных глубин, нижняя — горизонталь	ВБ перегораживающего сооружения; перед препятствием
Зона в $h_0>h>h_{cr}$ 	Ib — выпуклая кривая спада; верхняя асимптота — линия нормальных глубин	Водопад
Зона с $h<h_{cr}<h_0$ 	Ic — вогнутая кривая подпора; нижняя асимптота — прямая с уклоном i	Истечение из-под затвора; сопряжение струй с НБ
	Бурный поток $i>i_{cr}$; $h_0<h_{cr}$	
Зона а $h>h_{cr}>h_0$	IIa — выпуклая кривая подпора; нижняя асимптота — горизонталь	Ниже гидравлического прыжка; перед преградой в бурном потоке

Зона в $h_{cr}>h>h_0$ 	IIв — вогнутая кривая спада; нижняя асимптота — линия нормальных глубин	Быстротоки
Зона с $h<h_0<h_{cr}$ 	IIс — выпуклая кривая подпора; нижняя асимптота — линия нормальных глубин	Истечение из-под затвора в водоток с большим уклоном
	Критический поток $i=i_{cr}$; $h_0=h_{cr}$	
Зона а $h>h_0$	IIIa — кривая подпора близка к горизонтали	Сопряжение широких водоемов с каналом при $i=i_{cr}$
Зона с $h<h_0$ 	IIIc — кривая подпора близка к горизонтали	Сопряжение каналов с уклонами $i>i_{cr}$ и $i=i_{cr}$

6.26. Значения функции Φ(η) при различных гидравлических показателях *x*

η	*x*									
	2	2,5	3	3,25	3,5	3,75	4	4,5	5	5,5
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0,10	0,100	0,100	0,100	0,100	0,100	0,100	0,100	0,100	0,100	0,100
0,20	0,202	0,201	0,200	0,200	0,200	0,200	0,200	0,200	0,200	0,200
0,30	0,309	0,304	0,302	0,301	0,300	0,300	0,300	0,300	0,300	0,300
0,40	0,423	0,411	0,407	0,404	0,403	0,403	0,402	0,401	0,400	0,400
0,50	0,549	0,527	0,517	0,513	0,510	0,508	0,507	0,504	0,502	0,501
0,60	0,693	0,657	0,637	0,630	0,624	0,621	0,617	0,610	0,607	0,605
0,62	0,725	0,685	0,663	0,654	0,648	0,644	0,640	0,632	0,629	0,626
0 64	0,758	0,714	0,689	0,680	0,673	0,668	0,664	0,656	0,651	0,648
0,66	0,792	0,744	0,717	0,706	0,699	0,694	0,688	0,680	0,674	0,670
0,68	0,829	0,776	0,746	0,734	0,725	0,720	0,713	0,704	0,698	0,692
0,70	0,867	0,809	0,776	0,763	0,753	0,746	0,739	0,728	0,722	0,716
0,72	0,907	0,843	0,807	0,793	0,781	0,774	0,766	0,754	0,747	0,740
0,74	0,950	0,880	0,840	0,823	0,811	0,802	0,794	0,780	0,773	0,764
0,76	0,996	0,919	0,874	0,855	0,843	0,832	0,823	0,808	0,799	0,788
0,78	1,045	0,960	0,911	0,890	0,877	0,865	0,854	0,837	0,826	0,814
0,80	1,098	1,006	0,950	0,927	0,913	0,900	0,887	0,867	0,854	0,842
0,82	1,156	1,056	0,993	0,968	0,951	0,937	0,922	0,898	0,884	0,872
0,84	1,221	1,110	1,040	1,013	0,992	0,976	0,960	0,933	0,917	0,904
0,86	1,293	1,170	1,092	1,062	1,039	1,019	1,002	0,972	0,953	0,938

0,88	1,375	1,238	1,151	1,116	1,092	1,069	1,049	1,015	0,992	0,975
0,90	1,472	1,316	1,218	1,179	1,152	1,127	1,103	1,065	1,038	1,017
0,91	1,527	1,361	1,257	1,216	1,186	1,159	1,132	1,093	1,063	1,040
0,92	1,589	1,411	1,300	1,257	1,223	1,194	1,165	1,124	1,091	1,066
0,93	1,658	1,469	1,348	1,302	1,265	1,235	1,204	1,159	1,122	1,095
0,94	1,738	1,535	1,403	1,352	1,312	1,280	1,247	1,198	1,157	1,128
0,95	1,831	1,610	1,467	1,411	1,367	1,332	1,297	1,241	1,197	1,165
0,96	1,945	1,701	1,545	1,483	1,435	1,395	1,356	1,292	1,246	1,209
0,97	2,092	1,820	1,644	1,575	1,521	1,475	1,431	1,362	1,308	1,265
0,98	2,297	1,985	1,783	1,703	1,640	1,587	1,537	1,460	1,394	1,344
0,99	2,646	2,264	2,018	1,921	1,844	1,777	1,714	1,614	1,538	1,474
1,00	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞
1,01	2,652	2,863	1,419	1,265	1,138	1,031	0,936	0,790	0,680	0,598
1,02	2,307	1,591	1,193	1,053	0,940	0,847	0,766	0,641	0,546	0,474
1,03	2,107	1,432	1,061	0,931	0,827	0,742	0,668	0,555	0,468	0,402
1,04	1,966	1,320	0,967	0,845	0,747	0,668	0,600	0,494	0,415	0,353
1,05	1,857	1,234	0,896	0,779	0,687	0,612	0,548	0,447	0,375	0,317
1,07	1,693	1,105	0,790	0,682	0,600	0,529	0,471	0,381	0,316	0,266
1,09	1,573	1,009	0,713	0,612	0,534	0,469	0,415	0,332	0,271	0,226
1,11	1,477	0,933	0,652	0,557	0,482	0,422	0,372	0,293	0,237	0,196
1,13	1,398	0,872	0,602	0,512	0,442	0,384	0,337	0,263	0,211	0,172
1,15	1,331	0,821	0,561	0,475	0,407	0,353	0,308	0,238	0,190	0,153
1,17	1,273	0,775	0,525	0,442	0,377	0,326	0,283	0,217	0,173	0,137
1,19	1,222	0,736	0,495	0,413	0,352	0,302	0,262	0,200	0,158	0,124
1,21	1,177	0,701	0,467	0,388	0,330	0,282	0,243	0,184	0,144	0,113

Продолжение

η	x									
	2	2,5	3	3,25	3,5	3,75	4	4,5	5	5,5
1,23	1,136	0,670	0,442	0,366	0,310	0,263	0,227	0,170	0,132	0,103
1,25	1,098	0,643	0,420	0,346	0,292	0,247	0,212	0,158	0,121	0,094
1,27	1,065	0,618	0,400	0,328	0,276	0,233	0,199	0,147	0,111	0,086
1,29	1,033	0,594	0,382	0,312	0,261	0,220	0,187	0,137	0,103	0,079
1,31	1,004	0,571	0,365	0,297	0,247	0,208	0,176	0,129	0,095	0,073
1,33	0,977	0,551	0,349	0,283	0,235	0,197	0,166	0,121	0,089	0,067
1,35	0,952	0,533	0,334	0,271	0,224	0,187	0,157	0,113	0,083	0,061
1,37	0,928	0,516	0,322	0,259	0,214	0,177	0,149	0,106	0,077	0,056
1,40	0,896	0,492	0,304	0,243	0,199	0,165	0,137	0,097	0,070	0,050
1,42	0,876	0,477	0,293	0,233	0,191	0,157	0,131	0,091	0,066	0,046
1,44	0,856	0,463	0,283	0,225	0,183	0,150	0,125	0,085	0,062	0,044
1,46	0,838	0,450	0,273	0,217	0,175	0,144	0,119	0,081	0,058	0,042
1,48	0,821	0,438	0,263	0,209	0,168	0,138	0,113	0,077	0,054	0,040
1,5	0,805	0,426	0,255	0,201	0,162	0,132	0,108	0,073	0,052	0,038
1,6	0,733	0,376	0,218	0,170	0,134	0,108	0,087	0,058	0,039	0,027
1,7	0,675	0,336	0,189	0,145	0,113	0,090	0,072	0,046	0,030	0,020
1,8	0,626	0,303	0,166	0,124	0,096	0,077	0,060	0,037	0,023	0,015
1,9	0,585	0,253	0,147	0,108	0,083	0,066	0,050	0,030	0,018	0,011
2,0	0,550	0,216	0,132	0,097	0,073	0,057	0,043	0,025	0,015	0,008
2,2	0,490	0,188	0,108	0,077	0,057	0,043	0,032	0,018	0,010	0,006
2,4	0,444	0,165	0,090	0,063	0,046	0,034	0,024	0,013	0,007	0,004
2,6	0,405	0,146	0,076	0,052	0,037	0,028	0,019	0,0095	0,0050	0,0025
2,8	0,374	0,131	0,065	0,044	0,030	0,022	0,015	0,0075	0,0040	0,0015
3,0	0,346	0,104	0,056	0,037	0,025	0,0185	0,0125	0,0060	0,0030	0,00075
3,5	0,294	0,084	0,041	0,026	0,017	0,0125	0,0075	0,0035	0,0020	0,00050
4,0	0,255	0,070	0,031	0,019	0,012	0,0085	0,0050	0,0020	0,0010	0,00025
4,5	0,226	0,059	0,025	0,014	0,009	0,0065	0,0035	0,0015	0,0005	0
5,0	0,203	0,047	0,020	0,010	0,007	0,0050	0,0025	0,0010	0	0
6,0	0,168	0,029	0,014	0,007	0,004	0,0030	0,0015	0,0005	0	0
8,0	0,126	0,021	0,009	0,004	0,002	0,0015	0,0010	0,0002	0	0
10,0	0,100	0	0,005	0,002	0,001	0,0005	0,0005	0	0	0

6.27. Значения функции $f(\xi)$ при различных гидравлических показателях x

ξ	x									
	2	2,5	3	3,25	3,5	3,75	4	4,5	5	5,5
0	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000
0,10	0,9003	0,9001	0,9000	0,9000	0,9000	0,9000	0,9000	0,9000	0,9000	0,9000
0,20	0,8027	0,8010	0,8004	0,8003	0,8002	0,8001	0,8001	0,8000	0,8000	0,8000
0,30	0,7090	0,7042	0,7020	0,7014	0,7010	0,7007	0,7005	0,7002	0,7001	0,7001
0,40	0,6213	0,6116	0,6064	0,6048	0,6036	0,6027	0,6021	0,6012	0,6007	0,6004
0,50	0,5417	0,5252	0,5156	0,5124	0,5098	0,5078	0,5063	0,5040	0,5026	0,5017
0,60	0,4720	0,4478	0,4324	0,4268	0,4223	0,4186	0,4156	0,4109	0,4078	0,4056
0,62	0,4594	0,4336	0,4169	0,4108	0,4059	0,4017	0,3983	0,3931	0,3894	0,3869
0,64	0,4474	0,4199	0,4019	0,3953	0,3898	0,3853	0,3815	0,3756	0,3714	0,3685
0,66	0,4358	0,4067	0,3874	0,3802	0,3743	0,3692	0,3650	0,3585	0,3538	0,3503
0,68	0,4248	0,3940	0,3735	0,3657	0,3592	0,3537	0,3491	0,3418	0,3365	0,3325
0,70	0,4143	0,3820	0,3600	0,3517	0,3446	0,3387	0,3336	0,3256	0,3196	0,3151
0,72	0,4044	0,3705	0,3472	0,3382	0,3307	0,3242	0,3187	0,3098	0,3032	0,2982
0,74	0,3951	0,3596	0,3350	0,3254	0,3173	0,3104	0,3044	0,2947	0,2874	0,2817
0,76	0,3863	0,3493	0,3234	0,3133	0,3046	0,2972	0,2907	0,2802	0,2721	0,2658
0,78	0,3782	0,3397	0,3125	0,3018	0,2926	0,2847	0,2777	0,2664	0,2575	0,2506
0,80	0,3707	0,3308	0,3024	0,2911	0,2814	0,2729	0,2655	0,2533	0,2437	0,2361
0,82	0,3638	0,3226	0,2930	0,2812	0,2710	0,2620	0,2541	0,2410	0,2307	0,2223
0,84	0,3576	0,3152	0,2845	0,2722	0,2614	0,2520	0,2436	0,2297	0,2185	0,2095
0,86	0,3520	0,3085	0,2768	0,2639	0,2528	0,2428	0,2341	0,2193	0,2074	0,1977
0,88	0,3472	0,3026	0,2699	0,2567	0,2450	0,2347	0,2256	0,2100	0,1974	0,1870
0,90	0,3430	0,2976	0,2646	0,2504	0,2383	0,2276	0,2181	0,2018	0,1886	0,1776
0,91	0,3412	0,2954	0,2614	0,2476	0,2354	0,2245	0,2148	0,1982	0,1846	0,1733
0,92	0,3396	0,2934	0,2591	0,2451	0,2327	0,2217	0,2118	0,1949	0,1811	0,1695
0,93	0,3381	0,2916	0,2570	0,2429	0,2303	0,2191	0,2091	0,1920	0,1778	0,1660
0,94	0,3369	0,2901	0,2552	0,2409	0,2282	0,2169	0,2068	0,1894	0,1750	0,1629
0,95	0,3358	0,2888	0,2536	0,2392	0,2264	0,2150	0,2048	0,1871	0,1725	0,1602
0,96	0,3349	0,2877	0,2523	0,2378	0,2249	0,2134	0,2031	0,1853	0,1705	0,1580
0,97	0,3342	0,2868	0,2513	0,2367	0,2238	0,2122	0,2017	0,1838	0,1688	0,1562
0,98	0,3337	0,2862	0,2506	0,2359	0,2229	0,2113	0,2008	0,1827	0,1677	0,1549
0,99	0,3334	0,2858	0,2502	0,2355	0,2224	0,2107	0,2002	0,1821	0,1669	0,1541

Продолжение

ε	x									
	2	2,5	3	3,25	3,5	3,75	4	4,5	5	5,5
1,00	0,3333	0,2857	0,2500	0,2353	0,2222	0,2105	0,2000	0,1818	0,1667	0,1539
1,01	0,3334	0,2858	0,2501	0,2355	0,2224	0,2107	0,2002	0,1821	0,1669	0,1541
1,02	0,3337	0,2862	0,2506	0,2360	0,2229	0,2113	0,2008	0,1827	0,1677	0,1550
1,03	0,3343	0,2869	0,2514	0,2368	0,2238	0,2123	0,2019	0,1839	0,1690	0,1564
1,04	0,3349	0,2877	0,2525	0,2380	0,2251	0,2136	0,2033	0,1856	0,1709	0,1585
1,05	0,3359	0,2889	0,2539	0,2395	0,2268	0,2154	0,2053	0,1878	0,1734	0,1613
1,07	0,3384	0,2921	0,2577	0,2437	0,2313	0,2203	0,2105	0,1938	0,1801	0,1688
1,10	0,3437	0,2988	0,2660	0,2528	0,2412	0,2311	0,2221	0,2071	0,1953	0,1858
1,12	0,3483	0,3048	0,2734	0,2609	0,2501	0,2407	0,2325	0,2191	0,2090	0,2014
1,14	0,3539	0,3119	0,2822	0,2706	0,2607	0,2523	0,2451	0,2338	0,2258	0,2205
1,16	0,3603	0,3203	0,2927	0,2822	0,2734	0,2661	0,2601	0,2513	0,2461	0,2437
1,18	0,3677	0,3299	0,3047	0,2954	0,2880	0,2821	0,2775	0,2718	0,2699	0,2711
1,20	0,3760	0,3408	0,3184	0,3106	0,3048	0,3005	0,2977	0,2956	0,2977	0,3032
1,22	0,3853	0,3531	0,3338	0,3278	0,3238	0,3214	0,3205	0,3228	0,3296	0,3403
1,24	0,3955	0,3666	0,3510	0,3470	0,3450	0,3449	0,3463	0,3535	0,3659	0,3828
1,26	0,4068	0,3815	0,3701	0,3683	0,3687	0,3711	0,3752	0,3881	0,4069	0,4310
1,28	0,4191	0,3979	0,3911	0,3918	0,3949	0,4001	0,4072	0,4268	0,4530	0,4855
1,30	0,4323	0,4157	0,4140	0,4175	0,4236	0,4320	0,4426	0,4697	0,5044	0,5466
1,32	0,4467	0,4350	0,4390	0,4457	0,4551	0,4671	0,4815	0,5171	0,5616	0,6149
1,34	0,4620	0,4558	0,4660	0,4762	0,4894	0,5053	0,5240	0,5693	0,6248	0,691
1,36	0,4785	0,4781	0,4953	0,5093	0,5266	0,5470	0,5705	0,6265	0,695	0,775
1,38	0,4960	0,5021	0,5267	0,5449	0,5668	0,5922	0,621	0,689	0,771	0,868

1,40	0,5147	0,5276	0,5604	0,5832	0,610	0,641	0,676	0,757	0,855	0,971
1,42	0,5344	0,5548	0,597	0,624	0,657	0,694	0,735	0,831	0,946	1,083
1,44	0,5553	0,584	0,635	0,668	0,707	0,750	0,798	0,911	1,046	1,206
1,46	0,577	0,614	0,676	0,715	0,760	0,810	0,867	0,997	1,154	1,341
1,48	0,601	0,647	0,719	0,765	0,817	0,875	0,940	1,091	1,272	1,487
1,5	0,625	0,681	0,766	0,818	0,878	0,945	1,019	1,191	1,398	1,646
1,6	0,765	0,881	1,038	1,134	1,243	1,363	1,497	1,812	2,196	2,665
1,7	0,938	1,130	1,388	1,544	1,720	1,918	2,140	2,666	3,323	4,142
1,8	1,144	1,435	1,824	2,061	2,330	2,634	2,979	3,809	4,869	6,220
1,9	1,386	1,801	2,358	2,700	3,092	3,540	4,052	5,305	6,941	9,076
2,0	1,667	2,232	3,000	3,477	4,028	4,665	5,400	7,228	9,670	12,93
2,2	2,349	3,312	4,656	5,512	6,521	7,709	9,11	12,70	17,70	24,67
2,4	3,208	4,719	6,894	8,316	10,02	12,07	14,53	21,03	30,45	44,15
2,6	4,259	6,497	9,82	12,05	14,77	18,10	22,16	33,23	49,88	75,03
2,8	5,517	8,70	13,57	16,91	21,06	26,21	32,62	50,56	78,52	122,3
3,0	7,00	11,36	18,25	23,08	29,18	36,87	46,60	74,53	119,5	192,3
3,5	11,79	20,42	35,02	45,80	59,89	78,34	102,6	176,2	303,9	526,6
4,0	18,33	33,57	61	82,18	110,8	149,4	197,1	369,4	679,7	1 257
4,5	26,88	51,73	99	137,0	189,8	263,2	365,5	708,2	1 380	2 706
5,0	37,67	75,86	152	215,9	306,6	436	621	1 267	2 600	5 371
6,0	67,0	146,2	319	472,2	700,4	1 041	1 550	3 458	7 771	17 575
7,0	108,3	253,3	594	912,9	1406	2 169	3 355	8 079	19 604	47 884
8,0	163,7	406,7	1017	1614	2567	4 095	6 547	16 843	43 683	114 093
9,0	234,0	617,0	1632	2666	4366	7 169	11 802	32 202	88 561	245 291
10,0	324,3	894,0	2491	4175	7018	11 831	19 991	57 491	166 691	486 491

лиоративной практике, имеют вид:

при прямом уклоне $i>0$ $$\frac{dh}{dl}=i\,(1-K_0^2/K^2)/(1-jK_0^2/K^2); \qquad (6.20)$$

при обратном уклоне $i<0$ $$\frac{dh}{dl}=i\,(1-K'^2_0/K^2)/(jK'^2_0/K^2-1); \qquad (6.21)$$

ри $i=0$ $$\frac{dh}{dl}=(i_{cr}K^2_{cr}/K^2)/(j_{cr}K^2_{cr}/K^2-1), \qquad (6.22)$$

где K_0 — расходная характеристика равномерного движения с глубиной h_0, $K_0=Q/\sqrt{i}$; K — расходная характеристика неравномерного движения, $K=SC\sqrt{R}$; K_0' — расходная характеристика равномерного движения в русле с уклоном $i'=|i|$ и соответствующей ему глубиной h_0'; j — фиктивный параметр кинетичности, соответствующий равномерному движению в живом сечении с глубиной h неравномерного движения, $j=\alpha iC^2B/g\chi$; K_{cr} и j_{cr} — расходная характеристика и фиктивный параметр кинетичности при i_{cr} и h_{cr}.

Задача гидравлического расчета: определение формы свободной поверхности потока в зависимости от его глубины (табл. 6.25) путем решения уравнений (6.20)...(6.22) при заданных граничных условиях.

Для этого используют способ Б. А. Бахметьева, согласно которому длину свободной поверхности l_{1-2} между сечениями потока с глубинами h_1 и h_2 определяют зависимостями

при $i>0$ $$l_{1-2}=h_0\{\eta_2-\eta_1(1-j_m)[\Phi(\eta_2)-\Phi(\eta_1)]\}/i; \qquad (6.23)$$

при $i<0$ $$l_{1-2}=h_0'\{-(\eta_2'-\eta_1')+(1+j_m)[\Phi(\eta_2')-\Phi(\eta_1')]\}|i|; \qquad (6.24)$$

при $i=0$ $$l_{1-2}=h_{cr}\{j_{cr}(\xi_2-\xi_1)-[f(\xi_2)-f(\xi_1)]\}/i_{cr}, \qquad (6.25)$$

где η_2, η_2', ξ_2 — относительные глубины потока в сечении с h_2, $\eta_2=h_2/h_0$, $\eta_2'=h_2/h_0'$, $\xi_2=h_2/h_{cr}$; η_1, η_1', ξ_1 — то же в сечении с h_1, $\eta_1=h_1/h_0$, $\eta_1'=h_1/h_0'$, $\xi_1=h_1/h_{cr}$; $\Phi(\eta)$, $\Phi(\eta')$, $f(\xi)$ — функции параметров русла, $\Phi(\eta)=\int d\eta/(1-\eta^x)$, $\Phi(\eta')=\int d\eta'/[1-(\eta')^x]$, $f(\xi)=\int d\xi/(1-\xi^x)$; x — гидравлический показатель русла, при $i>0$ $x=2(\lg K_m/K_0-\lg h_m/h_0)$, при $i<0$ $x=2(\lg K_m/K_0'-\lg h_m/h_0')$, при $i=0$ $x=2(\lg K_m/K_{cr}-\lg h_m/h_{cr})$. Значения функций $\Phi(\eta)$, $f(\xi)$ в зависимости от глубины потока и показателя формы русла определяют по таблицам 6.26 и 6.27.

Основные типы задач при неравномерном установившемся плавно изменяющемся движении в призматических руслах.

Тип I. Заданы Q, i, n, h_1, h_2 для трапецеидальных русл дополнительно m и b. Необходимо определить форму и длину кривой свободной поверхности l_{1-2}.

Длину кривой l_{1-2} вычисляют по соответствующим заданному уклону i формулам (6.23)...(6.25), используя таблицы 6.26 и 6.27. Форму кривой подбирают по таблице 6.25.

Тип II. Заданы Q, i, n, h_2, m и b. Необходимо определить глубину в сечении, отстоящем от h_2 на расстоянии l_{1-2}.

Расчет ведут по тем же формулам, что и в первом случае. Если кривая свободной поверхности имеет асимптоты в верхней или нижней части (см. табл. 6.25), соответствующие граничные значения глубин h_1 (или h_2) принимают отличающимися от h_0 на 0,01...0,02 h_0.

6.3.4. НЕУСТАНОВИВШЕЕСЯ ДВИЖЕНИЕ ВОДЫ В КАНАЛАХ

Изменение параметров потока во времени в любом створе русла — *неустановившееся (нестационарное) безнапорное движение воды в каналах.* Проявляется оно в образовании волн перемещения, приводящих в движение

большие массы воды, во время паводков, половодий, при попусках, прорывах и т. д.

Основные характеристики движения — расход Q (средняя скорость v) и ордината свободной поверхности z (глубина h, площадь живого сечения S). При расчетах считают, что по всему живому сечению глубины, скорости одинаковы, то есть не учитывают поперечные составляющие местных скоростей и неравномерность распределения местных скоростей по живому сечению.

Неустановившееся движение может быть быстро и медленно изменяющимся.

Быстро изменяющееся движение происходит при перемещении прерывных волн, для которых характерен профиль свободной поверхности со значительной кривизной, резкое, почти мгновенное возрастание глубин на коротком участке. Такие волны образуются при прорыве плотины, при резком попуске в НБ и малой глубине в нем или при движении воды по сухому руслу.

Медленно изменяющееся движение — это движение волны перемещения, характеризующееся малой кривизной и значительной растянутостью мгновенного профиля (длинные волны). Волна одного направления возникает, если расход воды (или ее уровень) в створе возмущения (створе, где нарушается ранее существовавшее равномерное движение) только увеличивается или только уменьшается.

Волну называют прямой, если она перемещается вниз по течению, и обратной — если против течения. Волна положительна, если при ее перемещении уровень воды повышается, и отрицательна, если уровень воды понижается (табл. 6.28).

Дифференциальные уравнения одномерного медленно изменяющегося неустановившегося движения в открытых руслах при отсутствии бокового притока (уравнения Сен-Венана) имеют вид:

уравнение неразрывности

$$\frac{\partial S}{\partial t} + v\frac{\partial S}{\partial l} + S\frac{\partial v}{\partial l} = 0; \qquad (6.26)$$

динамическое уравнение (при $\alpha \neq 1$, $\alpha' \neq 1$)

$$i - \frac{\partial h}{\partial l} = \frac{\alpha v}{g}\cdot\frac{\partial v}{\partial l} + \frac{\alpha'}{g}\cdot\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{v^2}{C^2R}, \qquad (6.27)$$

где α — коэффициент кинетической энергии (коэффициент Кориолиса); α' — коэффициент количества движения (коэффициент Буссинеска). Решение их определяют по специальным номограммам и графикам, методами численного интегрирования или приближенными инженерными методами, базирующимися на применении ЭВМ.

Расчет неустановившегося движения заключается в определении основных характеристик потока в зависимости от местоположения сечения и времени. Решая систему (6.26) и (6.27), определяют функции $Q=Q\ (l,\ t)$ и $z=z\ (l,\ t)$, а по их значениям остальные характеристики v_m, S, h_m. При фиксированной длине волны решение уравнений Сен-Венана дает гидрограф $Q=Q(t)$ и график колебания уровней воды $z=z(t)$; при фиксированном времени t получают $z=z(l)$ и $Q=Q(l)$, описывающие мгновенный продольный профиль волны.

Скорость распространения фронта положительной волны в прямоугольном русле вычисляют по формуле (знак плюс для прямой волны, минус для обратной):

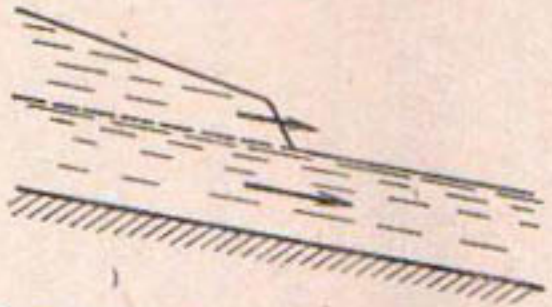
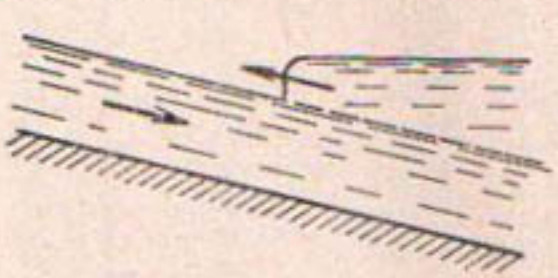
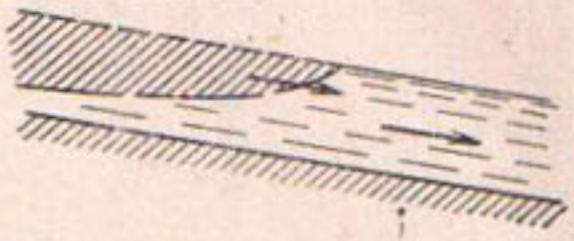
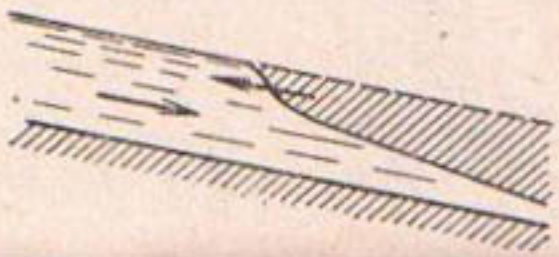
$$C_0 = v_0 \pm \sqrt{gh_0}\,(1 + 3h_w/4h_0), \qquad (6.28)$$

где h_0 — первоначальная глубина наполнения; h_w — высота волны, для положительной волны $h_w>0$ (рис. 6.9).

При $h_w/h_0 < 0{,}1$ $\quad C_0 = v_0 \pm \sqrt{gh_0}$, (6.29)

при $v=0$ (неподвижная жидкость) $C_0=\sqrt{gh_0}$ (формула Лагранжа).

6.28. Основные типы волн при неустановившемся движении потока

Вид волны	Тип волны по направлению движения и перемещению уровня	Изменения		Область появления
		расхода	уровня	
Волна наполнения 	Прямая положительная	Увеличиваются по течению		Увеличение расхода в створе
Волна подпора 	Обратная положительная	Уменьшается вверх по течению	Увеличивается вверх по течению	ВБ при уменьшении расхода, пропускаемого гидросооружением
Волна отлива 	Прямая отрицательная	Уменьшаются вниз по течению		Спад паводка и другие случаи уменьшения расхода в створе
Волна излива 	Обратная отрицательная	Увеличивается вверх по течению	Уменьшается вверх по течению	ВБ при увеличении расходов, пропускаемых через гидросооружение

Для русл с непрямоугольным поперечным сечением вместо h_0 принимают S_0/B' (где S_0 — площадь живого сечения до возникновения волны; B' — ширина по верху живого сечения при $h=h_0+0{,}5h_w$).

Параметры каналов с неустановившимся движением потока при автоматизированном водораспределении устанавливают с учетом динамических характеристик автоматических регуляторов и потребителей.

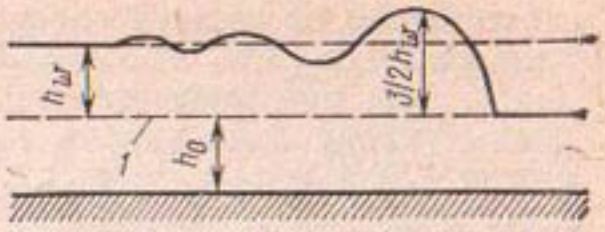


Рис. 6.9. Схема движения волны перемещения:
1 — первоначальное положение свободной поверхности

6.3.5. ОСОБЕННОСТИ ГИДРАВЛИЧЕСКОГО РАСЧЕТА КАНАЛОВ ПРИ ЛЕДЯНОМ ПОКРОВЕ

Гидравлический режим каналов, рассчитанных на круглогодичную эксплуатацию в районах с суровым климатом, должен предусматривать защиту его от снежных заносов, образования наледей, зажоров и заторов льда, нарушающих нормальную эксплуатацию и приводящих к необратимым деформациям русла.

Нормальный пропуск зимнего расхода в канале обеспечивается, если число Фруда по длине канала в период замерзания не превышает 0,06, в период вскрытия — 0,08. Достигают этого созданием подпора или ограничением расхода воды. Критические скорости течения воды для этого периода определяют по таблице 6.29.

6.29. Критические скорости течения воды в канале v_{cr}, м/с

Средняя глубина h_m, м	В период замерзания	В период вскрытия
1	0,19	0,25
2	0,27	0,35
3	0,33	0,43
4	0,38	0,50
5	0,42	0,56
6	0,46	0,61
7	0,50	0,66
>7	0,50	0,66

Расход воды в канале изменяют только после установления устойчивого ледяного покрова толщиной 15...20 см для кристаллического льда и 30 см для обломочного или шугового с пределом прочности на сжатие 0,4...0,6 МПа.

В период глубоких оттепелей изменения расходов и уровня воды не допускают. Суточное изменение уровня воды должно быть в пределах +20... —10 см.

Пропускную способность каналов, покрытых льдом, определяют для условий равномерного движения воды

$$Q_w = S_w v_w, \qquad (6.30)$$

где S_w — площадь водного сечения канала подо льдом, $S_w=S-S_d$ (S — площадь водного сечения открытого канала при зимнем наполнении; S_d — площадь погруженного льда). Зимнюю скорость течения определяют по формуле Шези (6.14) при

$$n_w = \sqrt{(n_d^2\chi_d + n^2\chi)/(\chi_d+\chi)}; \qquad R_w = S_w/(\chi_d+\chi), \qquad (6.31)$$

где n_d — коэффициент шероховатости нижней поверхности ледяного покрова; n — коэффициент шероховатости русла; χ_d, χ — смоченные периметры со-

ответственно по нижней поверхности ледяного покрова и русла. Для широких каналов с $B>10\,h_m$ $R_w \simeq S_w/2B_d$ (B_d — ширина канала по нижней поверхности льда). Для равномерного движения продольные уклоны водной поверхности равны уклону льда канала, $i_w=i$. На участках машинного водоподъема возможно $i_w \neq i$, если требуется увеличить скорости течения после установления ледостава.

Площадь погруженного льда находят по формуле

$$S_d = 0{,}9 h_d (B + B_d)^2, \qquad (6.32)$$

где h_d — толщина льда, м.

Толщину ледяного покрова на каналах определяют по данным многолетних наблюдений на водотоках-аналогах.

Ориентировочно начальную толщину льда определяют по формуле

$$h_{d1} = [(v/0{,}85)^2 + 0{,}2]/0{,}5\,|t|, \qquad (6.33)$$

где v — средняя скорость течения воды при установлении ледостава, м/с; t — средняя суточная температура воздуха на дату замерзания, °С. Формула действительна для средних скоростей течения, не превышающих 0,5 м/с.

На каналах с небольшими скоростями течения ($v=0{,}1\ldots0{,}3$ м/с) и скоростью ветра в период замерзания свыше 5 м/с начальную толщину льда рассчитывают по формуле

$$h_{d1} = 1{,}39\sqrt{A}, \qquad (6.34)$$

где A — коэффициент турбулентного перемешивания, см²/с, $A=0{,}028\ (h_w^2/T)$ (h_w и T — соответственно высота (см) и период (c) волны).

Пропускную способность канала проверяют на максимальную толщину льда, определенную по формулам (6.33) и (6.34), и максимальную зимнюю среднюю толщину, установленную по аналогам или региональным формулам.

6.4. ФИЛЬТРАЦИЯ ИЗ КАНАЛОВ

6.4.1. СТАДИИ ФИЛЬТРАЦИИ

Фильтрация — движение воды сквозь пористую среду в естественных пластах грунта под поверхностью земли.

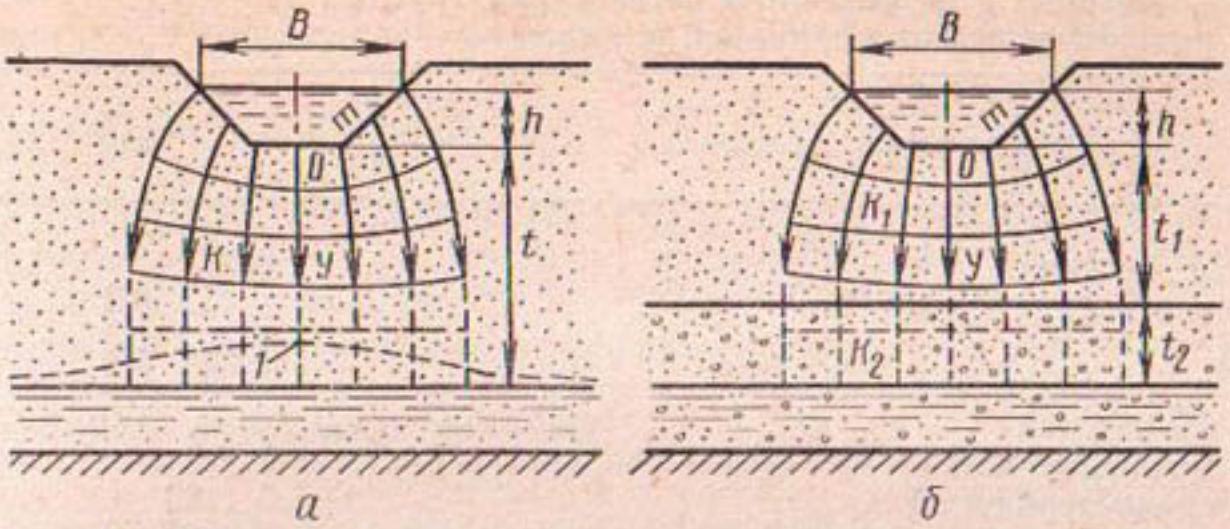
Длительная фильтрация воды из оросительных каналов протекает в двух основных, качественно отличающихся стадиях: без подпора — свободная фильтрация и фильтрация с подпором.

Фильтрация без подпора — грунты зоны аэрации смачиваются в условиях неполного насыщения пор грунта водой без взаимодействия с естественным грунтовым потоком. *Фильтрация с подпором* — фильтрационный поток из канала соединяется и взаимодействует с грунтовым потоком.

Для каналов в грунтовом русле при небольшой мощности зоны аэрации фильтрация без подпора переходит в подпертую с момента смыкания фронта смачивания с УГВ. Продолжительность ее обычно составляет несколько суток или недель. Фильтрационный поток неустановившийся, потери воды уменьшаются с течением времени. Для каналов с маловодопроницаемой одеждой или экраном фильтрация без подпора состоит из двух фаз: смачивания грунтов зоны аэрации и подъема УГВ под каналом. Свободная фильтрация переходит в подпертую лишь после подъема УГВ до дна канала, и продолжительность ее может достигать нескольких лет. Величина потерь воды зависит в этом случае в основном от проницаемости одежды, поэтому поток быстро стабилизируется, и расход его практически не изменяется.

6.4.2. РАСЧЕТ ФИЛЬТРАЦИОННЫХ ПОТЕРЬ ИЗ КАНАЛОВ

Величина потерь воды из каналов зависит от фильтрационных свойств и геологического строения грунтов по трассе, глубины залегания естественного УГВ и дренирующих слоев грунта или водоупора, длины смоченного пе-



а *б*

Рис. 6.10. Расчетные схемы фильтрации из каналов без подпора:

а — в однородных грунтах; *б* — в двухслойной толще грунтов; *1* — подъем УГВ, при котором свободная фильтрация переходит в подпертую

риметра и режима работы канала, наличия противофильтрационных устройств и других факторов. Фильтрационные потери ведут к повышению стоимости каналов из-за необходимости увеличения их пропускной способности и могут оказывать неблагоприятное влияние на окружающую территорию, вызывая подъем УГВ и вторичное засоление или заболачивание земель.

Расчет фильтрационных потерь на характерных участках каналов дает возможность прогнозировать влияние фильтрации на режим грунтовых вод в зоне канала, наметить мероприятия по ее уменьшению и по дренированию прилегающих территорий.

Свободная фильтрация. Потери воды из каналов непрерывного действия в земляном русле рассчитывают по зависимостям:

для каналов трапецендальной формы (рис. 6.10)

$$\text{при } b/h < 4 \quad Q_f = 0{,}116k\mu\,(B + 2h); \qquad (6.35)$$
$$\text{при } b/h > 4 \quad Q_f = 0{,}116k\,(B + Ah);$$

для каналов полигональной и параболической формы

$$Q_f = 0{,}116k\,(B + 2h), \qquad (6.36)$$

где Q_f — фильтрационный расход, м³/с на 1 км длины канала; k — коэффициент фильтрации грунтов ложа канала, м/сут (табл. 6.31); B, b, h — ширина по урезу воды, ширина по дну и глубина воды в канале, м; μ — поправочный коэффициент, имеющий следующие значения в зависимости от размеров сечения каналов:

	при $m=1$			при $m=1{,}5$			при $m=2$		
b/h	2	3	4	2	3	4	2	3	4
μ	0,98	1,0	1,14	0,78	0,98	1,04	0,62	0,82	0,94

A — коэффициент бокового растекания потока, определяемый по таблице 6.30.

6.30. Коэффициент бокового растекания фильтрационного потока в зависимости от размеров сечения каналов

m	B/h						
	5	6	7	10	12,5	15	20
1	3,0	3,2	3,4	3,7	3,9	4,0	4,2
1,5	2,5	2,7	3,0	3,2	3,4	3,6	3,9
2	2,1	2,3	2,7	2,9	3,1	3,3	3,6

6.31. Осредненные коэффициенты фильтрации грунтов и различных типов облицовок каналов

Грунты и типы облицовок	k_m, м/сут
Тяжелые суглинки	0,05
Средние и легкие суглинки	0,05...0,1
Супеси	0,10...0,5
Лесс	0,25...0,5
Песок пылеватый	0,50...1,0
Песок мелкозернистый	1...5
Песок среднезернистый	5...20
Бетонные монолитные облицовки, качество швов удовлетворительное	0,0007...0,0003
Бетонные монолитные облицовки со швами, герметизированными полимерными профильными прокладками	0,0002
Железобетонные сборные облицовки, швы герметизированы пороизолом и битумно-полимерными мастиками	0,0007...0,0003
Железобетонные сборные облицовки, швы герметизированы тиоколовыми мастиками	0,0004...0,00025
Сборные бетонопленочные облицовки	0,0003...0,00025
Монолитные бетонопленочные облицовки	0,0003...0,00025
Асфальтобетонные облицовки	0,0004...0,0002
Грунтопленочные экраны, поверхностные экраны из полимерных пленок	0,00035...0,00025

При многослойном основании (рис. 6.10, *б*) используют те же формулы, но коэффициент фильтрации определяют по формуле

$$k = \sum_{i=1}^{n} t_i \Big/ \sum_{i=1}^{n} (t_i/k_i), \qquad (6.37)$$

где t_i, k_i — соответственно мощность и коэффициент фильтрации слоя грунта; n — число слоев.

Фильтрационные потери из облицованного канала (рис. 6.11) при установившейся свободной фильтрации и одинаковой толщине облицовки t на дне и откосах рассчитывают по зависимости

$$Q_f = 0{,}0116k_s\,[b\,(h+t) + h\,(h + 2mt/\sqrt{1+m^2})]\,\sqrt{1+m^2}/t, \qquad (6.38)$$

где k_s — коэффициент фильтрации экрана, м/сут (табл. 6.31); m — заложение откоса.

Осредненный коэффициент фильтрации противофильтрационной облицовки в общем случае можно определить по формуле

$$k_{s,m} = \frac{Q_s t}{(h+t)\,A_s}, \qquad (6.39)$$

где Q_s — общий расход на фильтрацию через облицовку на площади A_s.

Расчетные зависимости осредненных коэффициентов фильтрации для различных типов облицовок с учетом характера их нарушений приведены ниже.

Бетонные и железобетонные облицовки, имеющие трещины с гладкими стенками,

$$k_{s,m} = \frac{\rho_w g n_t}{12\mu A_s}\, l_{t,m}\delta^3_{t,m};$$

трещины с шероховатыми стенками

$$k_{s,m} = \frac{\rho_w g n_t}{12\mu A_s} \frac{l_{t,m}\delta^3_{t,m}}{1 + 6\,(\Delta_m/\delta_{t,m})^{1,5}};$$

закольматированные трещины и разрушенные швы

$$k_{s,m} = k_c n_t \delta_{t,m} l_{t,m}/A_s.$$

Грунтопленочные облицовки, имеющие щели в пленочном экране на сильнопроницаемом основании ($\sigma = k_1/k_2 < <0{,}1$),

$$k_{s,m} = \frac{\pi k_1 n_c t i_{c,m}}{A_s \ln (16t/\pi\delta_{c,m})};$$

щели в экране с учетом проницаемости основания ($\sigma = k_1/k_2 \geqslant 0{,}1$)

$$k_{s,m} = \frac{\pi k_1 t}{h_1 + t} \frac{n_c\,(h + t - h_1)\, l_{c,m}}{A_s \ln (16t/\pi\delta_{c,m})};$$

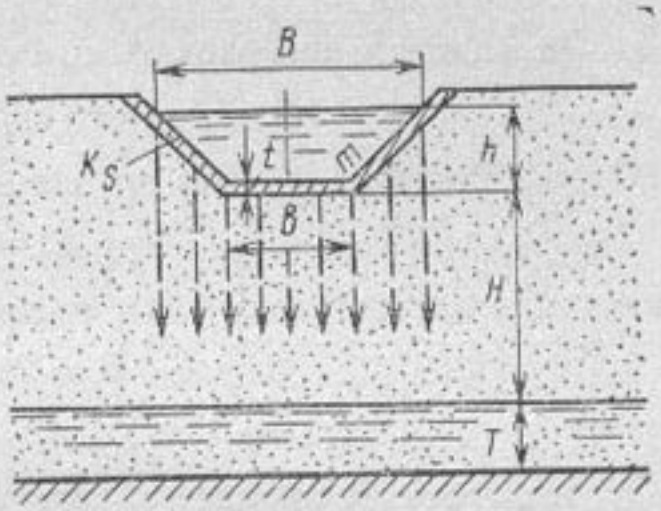


Рис. 6.11. Расчетная схема свободной фильтрации из облицованного канала:
t_s — толщина экрана; H — мощность слоя до УГВ; T — мощность водоносного слоя

отверстия в пленочном экране на сильнопроницаемом основании

$$k_{s,m} = \frac{\pi^2 k_1 t n_c r_m}{A_s \ln (8t/\pi r_m)};$$

отверстия в пленочном экране с учетом проницаемости основания

$$k_{s,m} = \frac{\pi^2 k_1 t\,(h + t - h_2)\, n_c r_m}{A_s\,(h + t) \ln (8t/\pi r_m)}.$$

Бетонопленочные облицовки, имеющие трещины в защитном бетонном покрытии и повреждения (щели или отверстия) в пленочном экране,

$$k_{s,m} = \frac{t\,(h + t - h_3)}{A_s\,(h + t)}\,(\text{Д} + \text{Б}).$$

Обозначения в формулах: $\delta_{t,m}$ и $l_{t,m}$ — средняя ширина и длина раскрытия трещины бетонного покрытия; Δ_m — средняя высота выступа шероховатости стенок трещин; n_t — число трещин и разрушенных швов в облицовке на площади A_s; k_c — коэффициент фильтрации кольматирующего слоя в трещине или шве; k_1 и k_2 — коэффициенты фильтрации защитного и подстилающего слоев грунтопленочной облицовки; $\delta_{c,m}$ и $l_{c,m}$ — средняя ширина и длина щели в пленочном экране; n_c — число повреждений в пленочном экране (щелей или отверстий); r_m — средний радиус отверстия в пленочном экране. В формулах использованы следующие обозначения:

$$h_1 = \frac{\sigma\,(h + t)\,\mathrm{Arch}\,(2l_1/\pi\delta_{c,m}) - H_k \ln (16t/\pi\delta_{c\,m})}{\sigma\,\mathrm{Arch}\,(2l_1/\pi\delta_{c,m}) + \ln (16t/\pi\delta_{c,m})};$$

$$h_2 = \frac{\pi^2\sigma\,(h + t) - 4H_k \ln (8t/\pi r_m)}{\pi^2\sigma + 4 \ln (8t/\pi r_m)};$$

$$h_3 = \frac{\text{Д}\,(h + t) + \text{Б}\,(h + t) - \text{С}H}{\text{Д} + \text{Б} + \text{С}},$$

где $l_1 = 0{,}5 \ldots 1{,}5\ (h + t + H_k)$; H_k — высота капиллярного вакуума грунта, $H_k = 0{,}3 \ldots 0{,}5\,h_k$; h_k — высота капиллярного поднятия воды; Д, Б, С — параметры расчета, определяемые по формулам:

для защитного бетонного покрытия, имеющего гладкие трещины

$$\text{Д} = \rho_w g n_t \delta^3_{t,m} l_{t,m}/12\mu t;$$

трещины с шероховатыми стенками

$$Д = \rho_w g n_t \delta^3_{t,m} l_{t,m} / 12 \mu t \, [1 + 6 \, (\Delta_m / \delta_{t,m})^{1,5}];$$

закольматированные трещины

$$Д = k_c n_t \delta_{t,m} l_{t,m} / t;$$

для пленочного экрана, имеющего щели в экране,

$$Б = 2hk_b n_c \, (l_{c,m} + 2h)/t;$$

$$С = \pi k n_c l_{c,m} / \mathrm{Arch} \, [\mathrm{ch} \, (\pi H / 2l_2) / \sin \, (\pi \delta_{c,m} / 2l_2)];$$

отверстия в экране

$$Б = \pi k_b n_c \, (r_m + 2h)^2 / t;$$

$$С = \pi k_b n_c r_m / \mathrm{Arch} \, [\mathrm{ch} \, (\pi H / 2R) / \sin \, (\pi r_m / 2R)],$$

где $l_2 = 0{,}5 \ldots 1{,}5 \, (h_2 + H_k)$, $R = 0{,}25 \ldots 0{,}75 \, (h + H_k)$; k и k_b — коэффициент фильтрации грунта и бетона; H — мощность водопроницаемого слоя.

Число нарушений противофильтрационных облицовок (n_t, n_c) и средние их размеры ($\delta_{t,m}$, $l_{t,m}$, $\delta_{c,m}$, $l_{c,m}$, r_m) определяют по выборочно обследованным площадям-участкам с помощью геофизического контроля или визуального осмотра. При отсутствии данных натурных обследований на стадии проектирования число и средние размеры отдельных нарушений принимают по объектам-аналогам или устанавливают экспериментально на опытном участке будущего канала.

6.32. Допускаемые коэффициенты фильтрации $k_{s,adm}$ и ориентировочный срок службы T_s одежд каналов

Тип одежды	$k_{s,adm}$, 10^{-6} см/с	T_s, лет
Бетонная монолитная	1...5	15...20
Железобетонная монолитная	2,5...3,5	20...25
Железобетонная сборно-монолитная	3,5...4,5	30...35
Железобетонная сборная	4,5...7	30...35
Бетонопленочная монолитная	0,1...1	20...25
Бетонопленочная сборно-монолитная	0,5...0,1	
Бетонопленочная сборная	1,0...1,5	
Грунтопленочная	0,5...1,5	
Асфальтобетонная	1...10	10...15
Экран из глинистых грунтов	0,1...1	35...40
Экран из полимерной пленки (эквивалентный глинистому экрану толщиной 1 м)	1...5	20...30

6.33. Коэффициент влияния подпора грунтовых вод на фильтрационные потери из канала α

Q, м³/с	Глубина залегания грунтовых вод, м							
	До 3	3	5	7,5	10	15	20	35
1	0,63	0,79	—	—	—	—	—	—
3	0,50	0,63	0,82	—	—	—	—	—
10	0,41	0,50	0,65	0,79	0,91	—	—	—
20	0,36	0,45	0,57	0,71	0,82	—	—	—
30	0,35	0,42	0,54	0,66	0,77	0,97	—	—
50	0,32	0,37	0,49	0,60	0,69	0,84	0,97	—
100	0,28	0,33	0,42	0,52	0,58	0,73	0,84	0,94

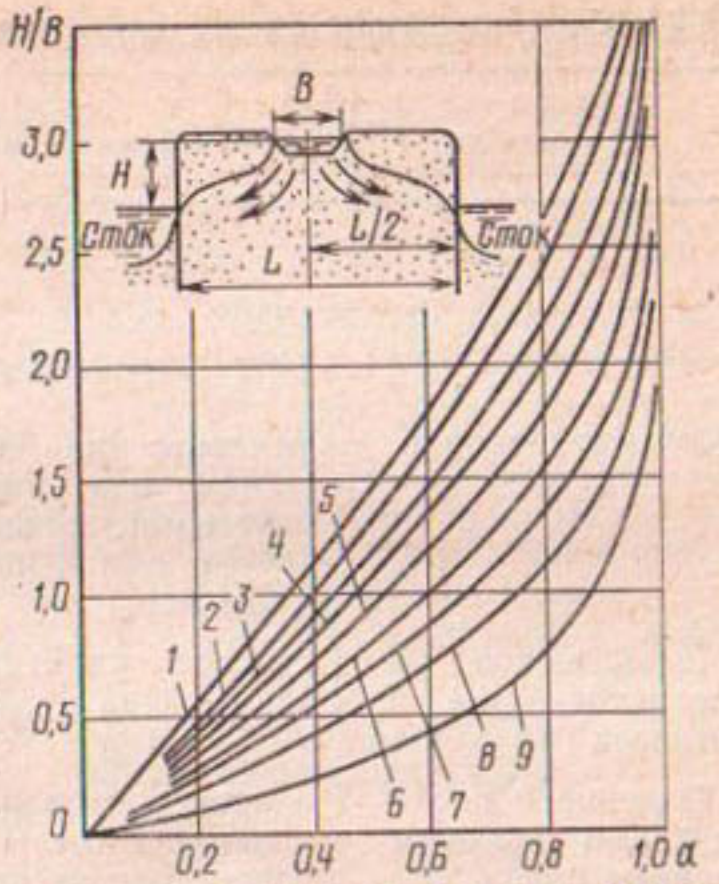


Рис. 6.12. График для определения коэффициента α в формуле фильтрационных потерь при фильтрации с подпором и относительной ширине растекания потока H/B:
1 — 1000; *2* — 500; *3* — 200; *4* — 100; *5* — 50; *6* — 20; *7* — 10; *8* — 5; *9* — 2

Оценку эффективности и качества противофильтрационных облицовок проводят проверкой условий

$$k_s \leqslant k_{s,adm} \quad \text{или} \quad \Pi_s \leqslant \Pi_{adm},$$

где $k_{s,adm}$ — допускаемый осредненный коэффициент фильтрации облицовки; Π_s — поврежденность защитного покрытия, $\Pi_s = A_n/A_s$ (A_n — общая площадь нарушений защитного покрытия; A_s — площадь покрытия); Π_{adm} — допускаемая поврежденность облицовки.

Допускаемые коэффициенты фильтрации облицовок по данным натурных исследований приведены в таблице 6.32.

Фильтрация с подпором. Потери определяют по зависимости

$$Q_{fL} = Q_f \alpha, \tag{6.40}$$

где Q_f — фильтрационные потери при свободной фильтрации, определяемые по формулам (6.35) и (6.36); α — коэффициент, характеризующий влияние подпора грунтовых вод на величину потерь ($\alpha < 1$); α зависит от превышения канала над зеркалом грунтовых вод и растекания фильтрационного потока (рис. 6.12), а также от расхода канала и залегания УГВ (табл. 6.33).

При сложных геологических и гидрогеологических условиях фильтрационные расходы определяют моделированием методом ЭГДА.

6.4.3. ОСНОВНЫЕ ТИПЫ ОДЕЖД МЕЛИОРАТИВНЫХ КАНАЛОВ

Одежда — искусственное крепление дна и откосов грунтовых каналов более прочным материалом с целью защиты от размыва течением, от волновых и механических воздействий, борьбы с фильтрационными потерями и улучшения условий пропуска расчетных расходов воды. Тип одежды выбирают на основе технико-экономического сравнения вариантов в зависимости от назначения канала, геологических условий, скорости течения, условий эксплуатации и наличия местных материалов.

Одежды оросительных каналов, работающих при резких колебаниях уровня воды в русле и залегания УГВ ниже его дна, предназначены для защиты откосов от размывов и эрозии, сокращения и предотвращения фильтрации. Для этой цели используют естественное экранирование русла, искусственные облицовки и экраны (табл. 6.34, рис. 6.13, 6.14).

Противофильтрационная эффективность различных типов облицовок в сравнении с каналами без облицовок, проложенными в различных грунтах, может быть оценена по таблице 6.31. Более подробно конструкции противофильтрационных облицовок оросительных каналов и технологии их устройства рассмотрены в томе «Строительство» (с. 43...51).

Одежды осушительных каналов, которые работают при значительном наполнении лишь 1...2 раза в году, а в остальное время пропускают незначительный дренажный сток, характерны мощным креплением дна и нижней части откоса и ослабленной защитой основной части откоса.

Основные виды *крепления зоны высачивания и нижней части откоса* приведены в таблицах 6.35 и 6.36.

6.34. Основные типы одежд оросительных каналов

Тип одежды	Конструкция и материалы	Область применения
	Естественное экранирование русла	
Кольматирование	Крепление дна и откосов забетоном или химическими веществами, проникающими в грунт и закупоривающими его поры	Противофильтрационная защита русла
Механическое уплотнение дна и откосов	Глубокое уплотнение (до 1 м) грунтов русла канала	То же
Рыхление с последующим заглаживанием русла	Рыхление поверхности слоя на глубину 0,4 м с последующим уплотнением	Противофильтрационная защита дна и откосов, сложенных глинами или суглинками с повышенной водопроницаемостью
Глинистые экраны	Экран из хорошо уплотняемых глин или суглинков толщиной 0,4...0,6 м на дне и 0,6...1 м на откосах. Сверху экран защищают слоем щебня в 0,1...0,15 м на дне и необходимой одеждой по подготовке на откосах	Противофильтрационная защита дна и откосов, сложенных сильнопроницаемыми несвязными грунтами
Крепление каменными материалами	Отсыпка гравия или щебня; каменная наброска (камня непосредственно или в ящиках из железобетона, металлических сеток и др.). В суффозионных грунтах, при высоком стоянии грунтовых вод требуется подготовка в виде обратного фильтра	Крупные каналы для защиты от размыва и волнового воздействия
	Искусственная облицовка и экраны	
Монолитные: (см. рис. 6.13)		
бетонные (реже железобетонные)	Бетонирование русла слоем толщиной 0,1...0,25 м (железобетонные — 0,06...0,15 м), в зоне льдообразования на 50...70% толще. На пучинистых грунтах устраивают подготовку из непучинистых грунтов	Каналы на прочных, устойчивых грунтах. Эффективны для борьбы с потерями воды на фильтрацию и уменьшение потерь энергии благодаря меньшей шероховатости. Недостаток — высокая стоимость, отсутствие высокопроизводительной техники

Продолжение

Тип одежды	Конструкция и материалы	Область применения
асфальтобетонные	Однослойное или многослойное покрытие из асфальта (толщина 2...2,5 см) или асфальтобетона (4...6 см). Основание предварительно обрабатывают гербицидами. На сильно деформируемых грунтах асфальтобетон армируют металлической сеткой	Эффективные облицовки каналов с заложением откосов $m \geqslant 2$. Стоимость на 30...40% ниже бетона. Высокие противофильтрационные свойства, отказ от швов. Однако повышается шероховатость канала, усиливается сцепление с наносами
глинобетонные	Слой механической смеси глины (24%), песка (36%) и гравия или щебня (40%)	Противофильтрационная защита русла канала
Сборные (см. рис. 6.14):		
железобетонные (реже бетонные)	Железобетонные (бетонные) плиты на слое гравийной подготовки	Прямые участки каналов. Высокое качество плит заводского изготовления, скорость строительства. Недостаток — большое число швов, повышающих водопроницаемость
Комбинированные		
Грунтопленочные	Экран из полимерной пленки по выровненному основанию с предварительной обработкой оснований гербицидами. Швы сваривают или склеивают. Экран покрывают слоем уплотняемого грунта толщиной не менее 0,5 м	Каналы в мягких грунтах с заложением откосов $m \geqslant 3$
Бетонные или железобетонные на полимерном экране	Стабилизированная полиэтиленовая пленка толщиной 0,4...0,6 мм по выровненному основанию, швы сварены или склеены. Сверху — монолитный бетон с песчаным заполнителем	При повышенных требованиях к противофильтрационным бетонным покрытиям
Многослойные	Нижний слой — монолитный бетон или сборные железобетонные плиты; слой — гидроизоляции из полимерных пленок или битумных мастик; верхний слой — монолитный бетон	Ответственные участки каналов (закругления и др.), при повышенных противофильтрационных требованиях

6.35. Крепление осушительных каналов в зоне высачивания и нижней части откоса

Вид крепления	Условия применения
Засев трав в обогащенный минеральными удобрениями растительный грунт слоем 5 см	Песчаные и супесчаные малоплодородные грунты
Гидропосев трав в смеси с минеральными удобрениями, мульчирующими материалами, стабилизирующими веществами путем распыления их водной струей	Грунты с содержанием гумуса 1,5% и более. Стабилизирующие вещества применяют на песчаных незатопляемых откосах
Покрытие дернокрошкой слоем 6 см в теплое время года с одним влагозарядковым поливом	Грунты, бедные элементами питания, или неплодородные
Сплошная одерновка свежесрезанным плотным луговым дерном толщиной 7 см, не покрытым мхом, ранней весной или в дождливые периоды лета	При откосах, сложенных на песках или жирных глинах с подсыпкой растительного грунта под дернину
Отсыпка фильтрующих материалов: щебня, гравия, шлаков, грунтовых агрегатов, укрепленных вяжущими веществами; коэффициент фильтрации пригрузки не менее чем в 10 раз выше коэффициента фильтрации грунта. Толщина и размеры пригрузки по расчету, но не менее 10 см	При откосах с заложением $m>1,5$
Крепление железобетонными плитами: плоскими, решетчатыми с дренажными отверстиями (см. табл. 6.36)	Откосы магистральных каналов; при скоростях потока $v\geqslant 5$ м/с плиты укладывают без подготовки, при бо́льших скоростях — на подготовку из гравия, дренажные отверстия заполняют фильтрующим материалом

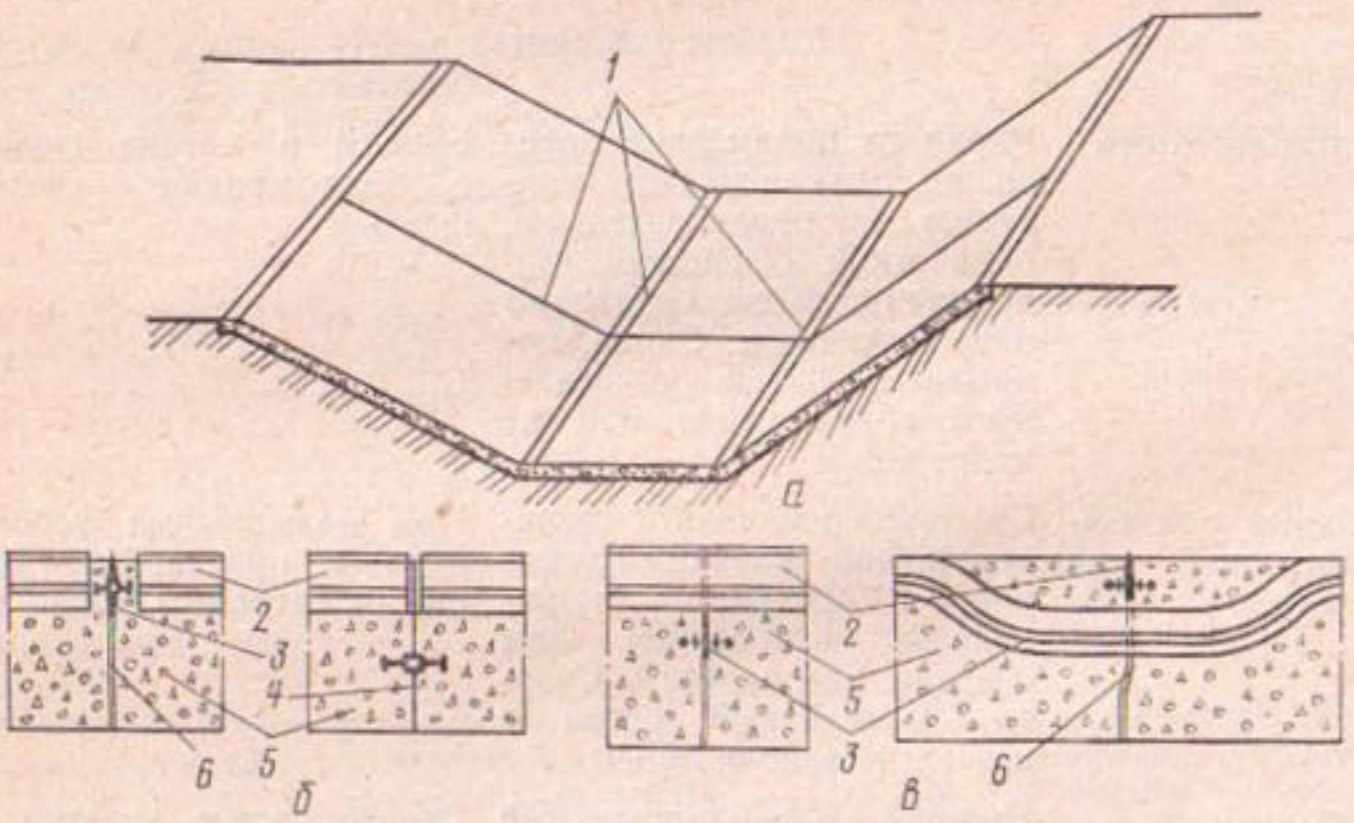
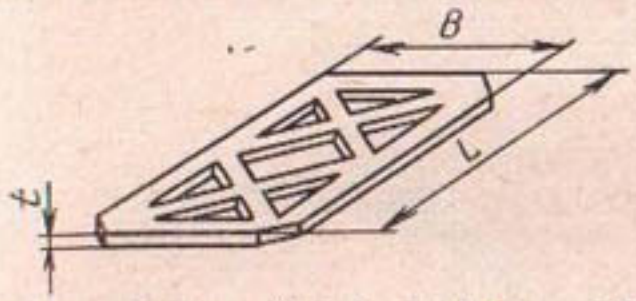
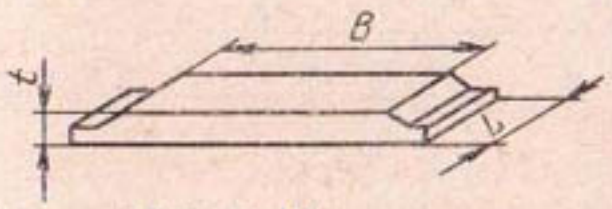
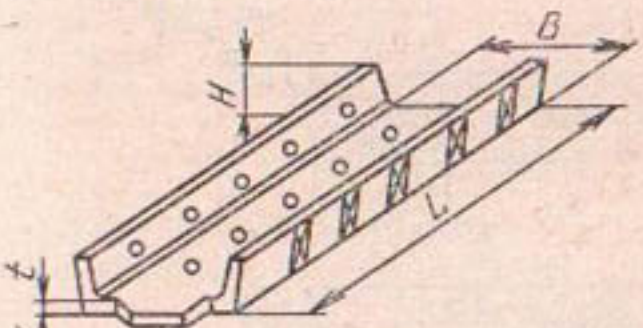
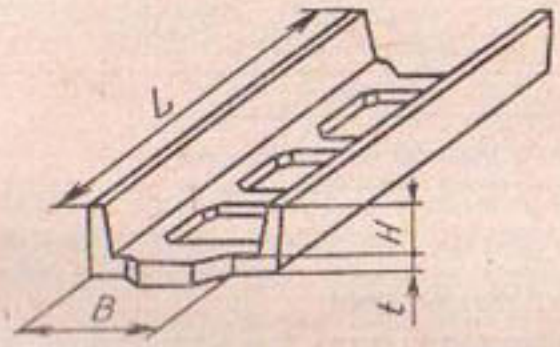
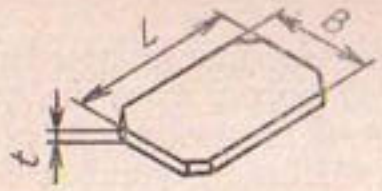
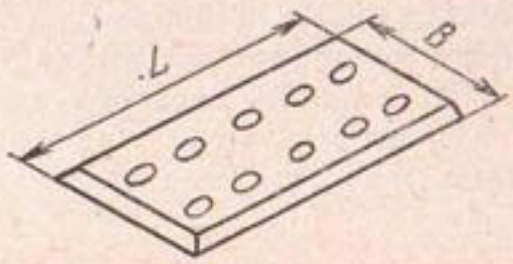


Рис. 6.13. Крепление канала из монолитного бетона с использованием герметизирующих профильных прокладок:

а — секция канала; *б* — узел пересечения продольных и поперечных швов с герметизирующими профилями в одном уровне (и строительно-деформационный шов); *в* — то же в разных уровнях; *1* — деформационный шов; *2, 3* — поперечный и продольный герметизирующие профили; *4* — строительный шов; *5* — бетон облицовки; *6* — усадочная трещина

6.36 Сборные железобетонные конструкции для крепления осушительных каналов

Конструкция и ее марка	Размеры, мм				Масса, кг
	L	*B*	*H*	*t*	
Плита решетчатая (ПРП 10-20)	2000	1000	—	100	210
					
Распорный блок (УБ-6, УБ-10, УБ-15)		600	—		60
	350	1000		100	93
		1500			135
					
Лоток (Л-6, Л-10)		600	200	60	720
	4000	1000	200		1000
					
Лоток облегченный (ЛО-6, ЛО-10)		600	200	80	520
	4000	1000	200		670
					
Плита плоская (ПП 5-10, ПП 10-15)	1000	500	—	60	72,5
	1500	1000	—		225
					
Плита плоская, предварительно напряженная, с дренажными отверстиями (НПКд 60-10, НПКд 60-15, НПКд 60-20)		1000	—		850
	6000	1500	—	60	1300
		2000	—		1730
					

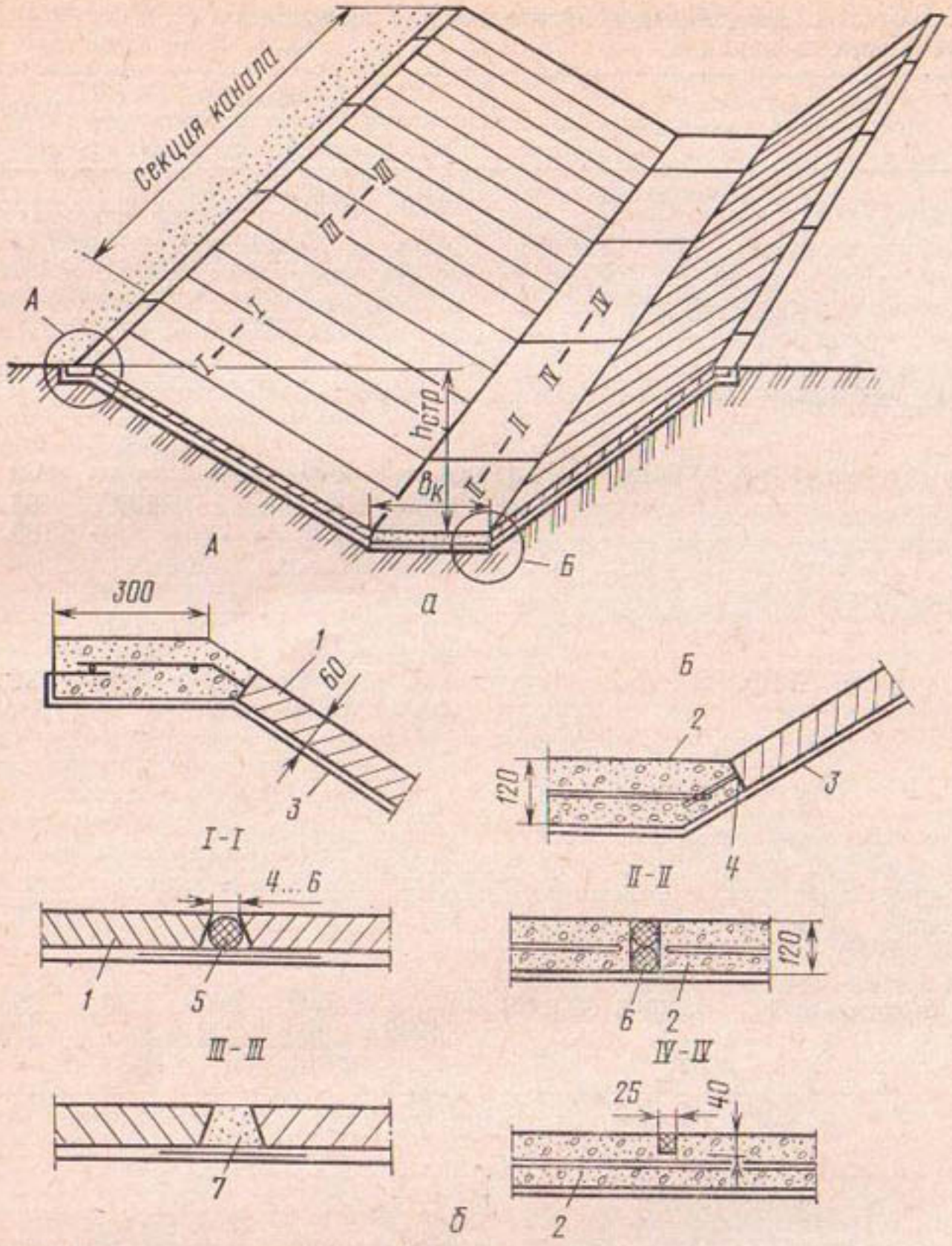


Рис. 6.14. Крепление канала из сборного железобетона:
а — секция канала; *б* — конструкция швов; *1* — сборная плита; *2* — монолитный железобетон; *3* — пленка ПВХ; *4* — битум; *5, 6, 7* — заполнители швов (*5, 6* — пороизол с тиоколом)

Крепление дна осушительных каналов проводят как с помощью естественных материалов (хворостяной канат, щиты из досок, упор из камня), так и железобетонных конструкций (плит и лотков). *Крепление хворостяным канатом* (рис. 6.15) состоит из кольев диаметром 0,07 м, длиной 1 м, забиваемых у основания откосов через 0,5 м, и укладываемого за ними хворостяного каната диаметром 0,15...0,2 м, который через 1 м пришивают к основанию кольями диаметром 0,05 м, длиной 0,75 м. За хворостяным канатом укладывают дери на ребро дерниной к канату и пригрузку из ленты дерна шириной 0,2 м. В плывунных грунтах по дну канала укладывают распорки из кольев диаметром 0,07 м и устраивают отсыпку из фильтрующего материала толщиной 0,1 м. Хворостяной канат изготавливают из ровного зеленого хвороста (без листьев) безеры, ольхи, лозы, ели и можжевельника диаметром до 30 мм; колья и распорки — из жердей хвойных и лиственных пород, кроме березы.

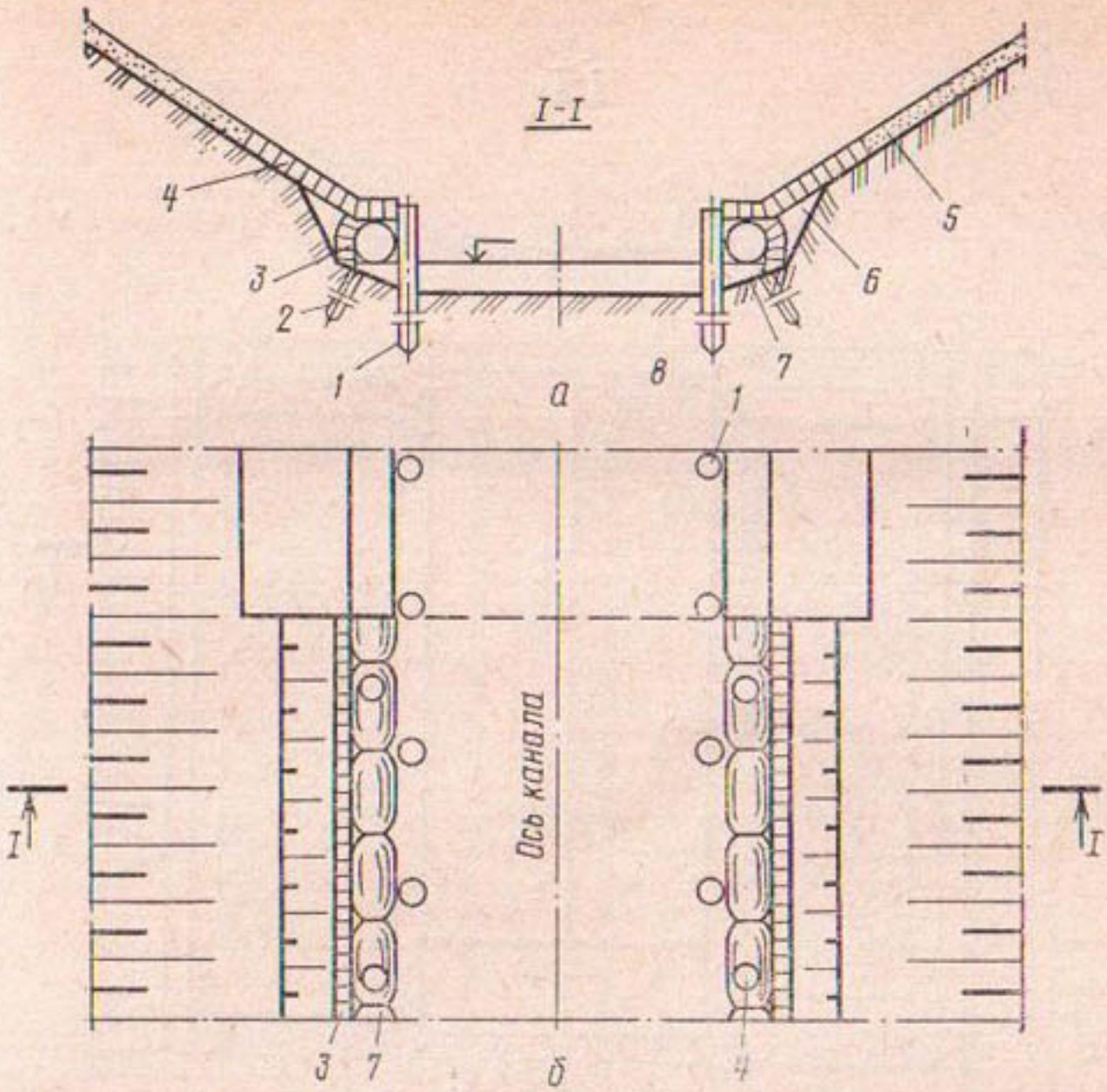


Рис. 6.15. Крепление осушительного канала хворостяным канатом:

а — поперечное сечение канала; *б* — план: *1* — колья (d=0,07 м, l=1 м); *2* — колья (d=0,05 м, l=0,75 м); *3* — дерн на ребро; *4, 5* — варианты крепления зоны высачивания соответственно сплошной одерновкой (t=0,07 м) или засевом трав (дернокрошкой t=0,06 м); *6* — засыпка местным грунтом; *7* — хворостяной канат; *8* — фильтрующий материал

Крепление щитами из досок аналогично предыдущему, но вместо хворостяного каната применяют деревянные щиты из необрезанных досок хвойных пород толщиной 25 мм. Между досками допускается зазор до 0,1 м. Длина щитов — 2 м, ширина — 0,2 м.

Крепление упором из камня диаметром 0,15...0,2 м укладывают у основания откосов, за ним на ребро дерн дерниной к камню и сверху пригружают лентой из дерна шириной 0,2 м. Пазухи засыпают местным грунтом с уплотнением. При размывающих скоростях воды в канале по дну устраивают отсыпку из фильтрующего материала толщиной 10 см.

Крепление плитами ПП, ПРП, НПКд и распорными блоками УБ дна канала аналогично креплению откоса (рис. 6.16).

Крепление железобетонными лотками: типовые лотки, облегченные ОЛ с дренажными отверстиями Л (см. табл. 6.36), укладывают по дну канала без подготовки (рис. 6.17). Пазухи засыпают местным грунтом с уплотнением. Под стыками укладывают стеклохолст в два слоя шириной 0,25 м. При средних скоростях воды в канале более 1,5 м/с пустоты в облегченных лотках заполняют фильтрующим материалом толщиной 8...10 см. При неразмывающих средних скоростях пустоты в лотках не заполняют.

Способы и конструкции креплений осушительных каналов в зависимости от грунтовых условий и типа высачивания грунтовых вод рассмотрены в томе «Осушение» (с. 237...241).

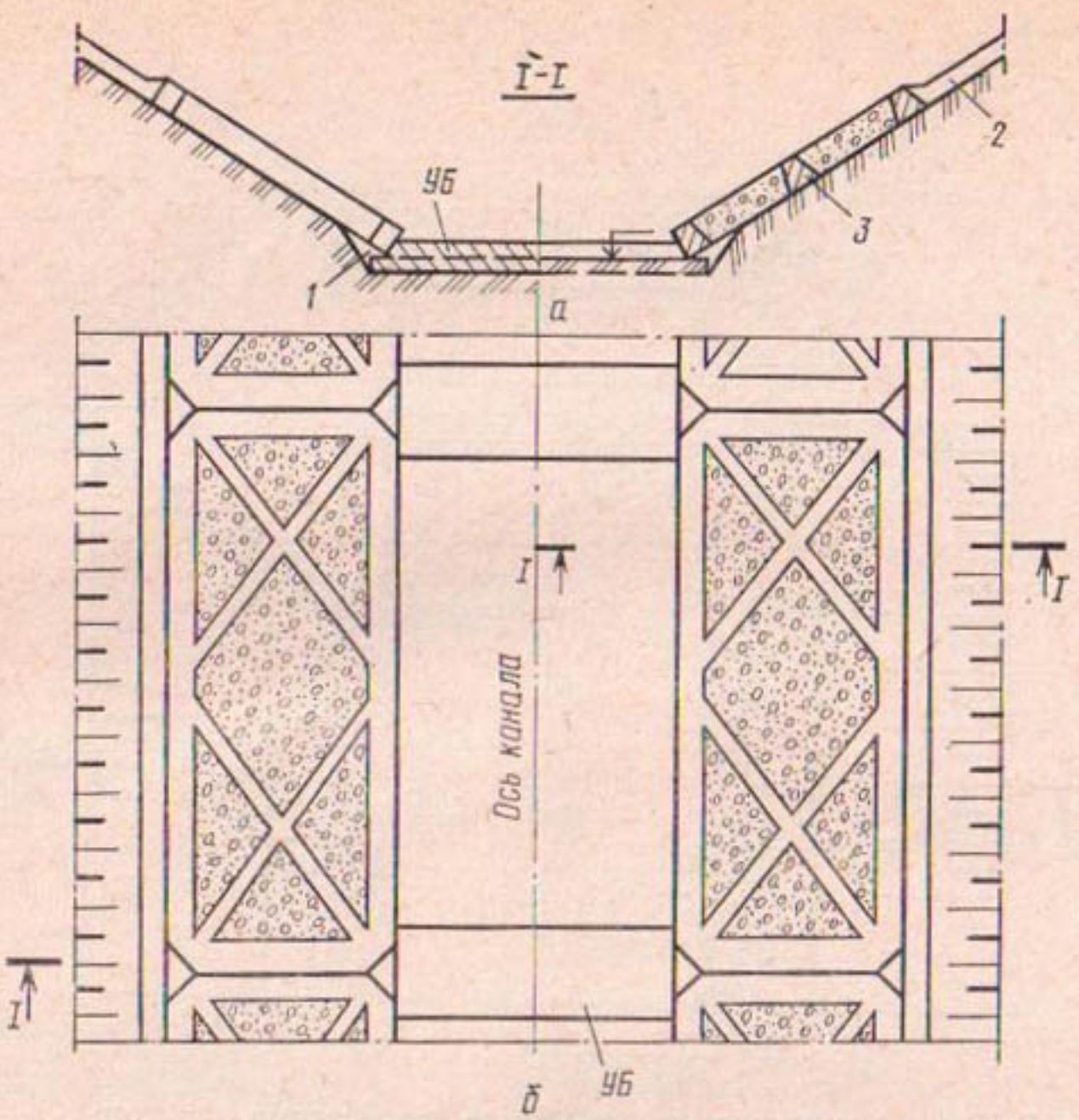


Рис. 6.16. Крепление канала решетчатыми плитами РП-10-20 с распорными блоками:

а — поперечное сечение канала; *б* — план; *1* — засыпка местным грунтом; *2* — засев трав (дерновкрошка *t*=0,06 м); *3* — плиты РП-10-20 с заполнением фильтрующим материалом

Особенности проектирования бетонных и железобетонных облицовок каналов. Конструкция *монолитных облицовок* должна обеспечить необходимую прочность материала, правильную разрезку строительными (усадочными) и деформационными швами. Класс и марку бетона выбирают с учетом обеспечения максимальной плотности и морозостойкости, так как он работает в тяжелых условиях влагонасыщенности при переменном замораживании и оттаивании (см. п. 2.8). При этом следует учитывать, что в процессе эксплуатации облицовки испытывают продольные (вдоль оси канала) и поперечные усилия. Первые вызываются температурными деформациями бетона, стесненными летом трением на контакте с грунтом основания, а зимой — смерзанием облицовки с грунтом. Вторые возникают от неравномерной податливости основания при загрузке облицовки транспортируемой водой, а также при морозном пучении и изменении уровня воды в канале зимой вследствие смерзания облицовки со льдом.

В связи с этим в районах с мягким климатом (малая глубина или отсутствие промерзания грунта) в облицовках каналов нарезают температурные швы. Расстояние между ними определяют расчетом, исходя из веса воды и облицовки, прочности последней, коэффициента трения ее по основанию и расчетного перепада температур. Иногда учитывают и вес промерзшего слоя грунта. На практике это расстояние равно 20...30 м. При более суровом климате облицовку проектируют с учетом неизбежного разрыва ее на участки, длина которых зависит от предельной растяжимости и прочно-

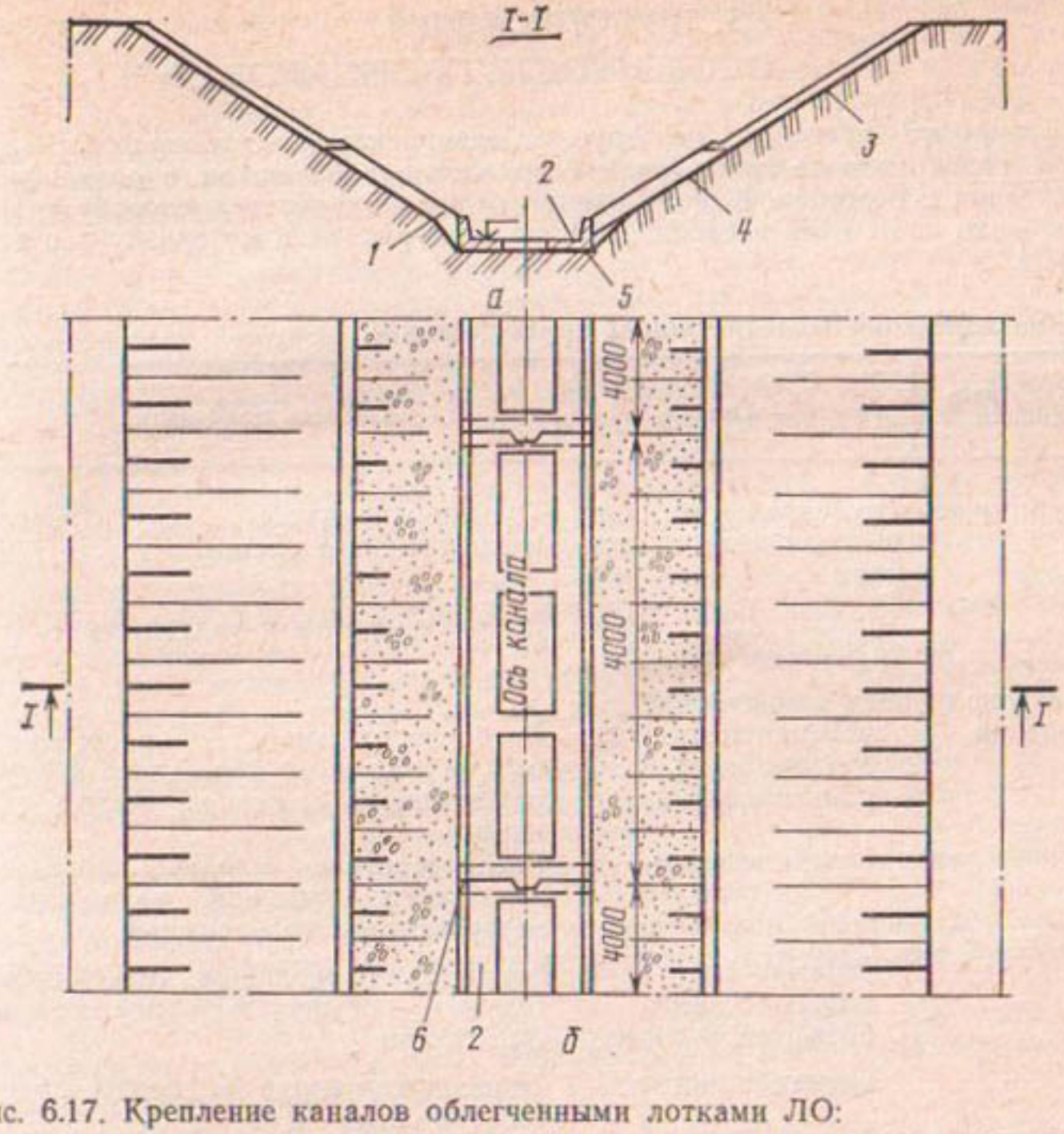


Рис. 6.17. Крепление каналов облегченными лотками ЛО:

а — поперечное сечение канала; *б* — план; *1* — засыпка местным грунтом; *2* — облегченный лоток ЛО; *3* — засев трав (дерновкрошка t=0,06 м); *4* — фильтрующий материал; *5* — стеклохолст в два слоя шириной 0,15 м; *6* — то же шириной 0,25 м

сти бетона и расчетного перепада температур. Обычно длина участка достигает 4...8 м. Деформационные швы в этом случае не устраивают или располагают через 6...8 м с максимальным упрощением конструкции. Для герметизации швов в бетон облицовки при строительстве закладывают герметизирующие прокладки. Хорошо зарекомендовали себя профильные прокладки ГП-140 и ГП-150 для монолитных облицовок толщиной 10...15 и 15...20 см; плоская прокладка ГП-265; крестообразные прокладки, надежно фиксирующие трещины в ослабленном сечении.

Конструкцию *сборных облицовок* выбирают, исходя из номенклатуры плит, изготавливаемых промышленностью, и рациональной стыковки. Сборные плиты выпускают двух видов: без выпусков по длинной стороне (НПК) и с выпусками по четырем сторонам. Последние обычно объединяют в карты. Чтобы избежать наползания плит друг на друга, целесообразно перекрывать откос одной плитой по всей длине. По бровке и дну канала ее замоноличивают. На крупных каналах дно устраивают полностью из монолитного бетона, чтобы обеспечить условия для механизированной очистки.

Рассчитывают плиты по схеме балки на упругом основании. Прочность при неравномерных деформациях от морозного пучения оценивают, исходя из гибкости плиты, степени пучинистости грунта и средней глубины промерзания.

Стыки обычно цементируют, для обеспечения большей прочности укладывают арматуру. Для герметизации ненесущих вертикальных стыков широко используют пороизоловые жгуты в сочетании с тиоколовой мастикой.

6.5. ТРУБОПРОВОДЫ. ОСОБЕННОСТИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ

Трубопровод — водовод из труб. Мелиоративные трубопроводы — это сложные разветвленные инженерные сооружения, работающие в разнообразных условиях и режимах. Классификация их по назначению и способу транспортирования воды дана в таблице 6.1, по конструкции и материалу — в таблице 6.36.

6.37. Классификация мелиоративных трубопроводов

Признак классификации	Тип	Область применения
По конструкции	Трубопровод с водонепроницаемыми стенками	Транспортирующие трубопроводы мелиоративных систем
	Трубопровод с фильтрующими стенками	Закрытые дрены и увлажнители
По материалу изготовления	Неметаллические:	
	асбоцементные, железобетонные, пластмассовые	Распределительная оросительная сеть, в том числе капельного и внутрипочвенного орошения, полива стоками
	пластмассовые	Распределители младших порядков капельного орошения, увлажнители внутрипочвенного орошения
	керамические, пластмассовые, асбестоцементные,	Закрытая проводящая сеть осушительных, осушительно-увлажнительных систем
	железобетонные	Транспортирующие водоводы оросительной сети
	Металлические:	
	стальные	На участках оросительной сети с внутренним давлением более 1,5 МПа; для переходов через водные преграды, овраги, дороги и другие препятствия. Не допускается применения на системах капельного орошения
	чугунные	Оросительная сеть для полива стоками

Диаметры мелиоративных трубопроводов изменяются от 10 до 2000 мм. Специально изготовленные трубы могут быть диаметром до 4...5 м.

Перспективные области применения напорных труб из различных материалов в зависимости от диаметров и внутреннего давления потока даны на рисунке 6.18. Характеристика безнапорных труб (керамических, пластмассовых, асбестоцементных, железобетонных), применяемых в мелиорации, приведена в томе «Строительство» (с. 318...326). Там же даны характеристики напорных асбестоцементных и железобетонных (виброгидропрессованных, центрифугированных, со стальным сердечником) труб (с. 328...332).

КПД оросительного трубопровода принимают не менее 0,98.

Арматура трубопроводных систем и особенности гидротехнических сооружений на трубопроводах описаны соответственно в п. 8.5 и 7.5.

Проектирование трубопроводов, особенно протяженных, разветвленных, с большой пропускной способностью требует комплексного учета действую-

щих на них факторов и специальных гидравлических и прочностных расчетов. При этом учитывают: нестационарные режимы движения воды в трубопроводах (гидравлический удар); защиту от сил морозного пучения или их ограничение; возможность просадочных и иных деформаций грунтов; почвенную и грунтовую агрессию к материалу труб и соединений; силовые воздействия от веса грунта, транспорта, транспортируемой воды, массы трубы.

Прокладывают трубопроводы как по поверхности грунта — поверхностные (рис. 6.19), так и на глубине — подземные (рис. 6.20).

Подземные трубопроводы укладывают на глубину, обеспечивающую выполнение ими эксплуатационных функций при минимальных суммарных внешних нагрузках (нагрузка от грунта с глубиной увеличивается, нагрузка от транспорта уменьшается). Глубину заложения трубопроводов от верха трубы принимают не менее средней за 10 лет максимальной глубины промерзания грунта, но не более 2 м. На участках с воздействием наземного транспорта трубопроводы укладывают на глубину не менее 1 м.

Трубопроводы укладывают на грунт ненарушенной структуры, предусматривая выравнивание или профилирование основания; засыпку и подбивку приямков и пазух мягким грунтом одновременно с обеих сторон; тщательное послойное уплотнение грунта засыпки между стенками трубы и траншеи; засыпку над трубой на высоту 0,5 м мягким грунтом без уплотнения, остальной части траншеи — любым грунтом без уплотнения; отсыпку по трассе траншеи валика, компенсирующего естественную осадку грунта. Укладку тонкостенных труб без уплотнения грунта засыпки между стенками труб и траншеи не допускают.

Отличительная особенность мелиоративных трубопроводов — их работа в условиях повышенной коррозионной активности воды и грунта. Метод защиты труб от внешней коррозии выбирают в зависимости от коррозионных свойств грунта, а также возможности коррозии от блуждающих токов в соответствии с требованиями ГОСТ 9015.74 и СНиП 2.03.11—85. При использовании стальных труб независимо от коррозионной активности воды предусматривают защиту их внутренней поверхности специальными антикоррозийными покрытиями.

На зимний период трубопроводы опорожняют обычно самотеком, прокладывая трубы с уклоном к месту опорожнения не менее 0,001. При невозможности предусматривают опорожнение с помощью насосов.

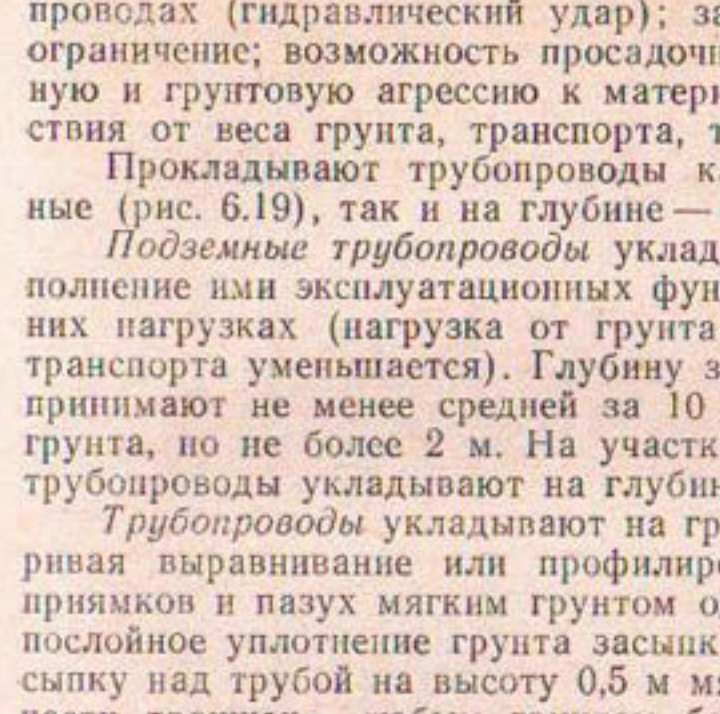


Рис. 6.18. Перспективные области применения напорных трубопроводов в орошении:

I — стальные; *II* — железобетонные; *III* — бетонные, полимербетонные, бетонополимерные; *IV* — асбестоцементные; *V* — пластмассовые

6.6. ГИДРАВЛИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ ТРУБОПРОВОДОВ

Трубопроводы рассчитывают на пропуск расчетного расхода с учетом материала труб и местных потерь при установившемся движении воды. В напор-

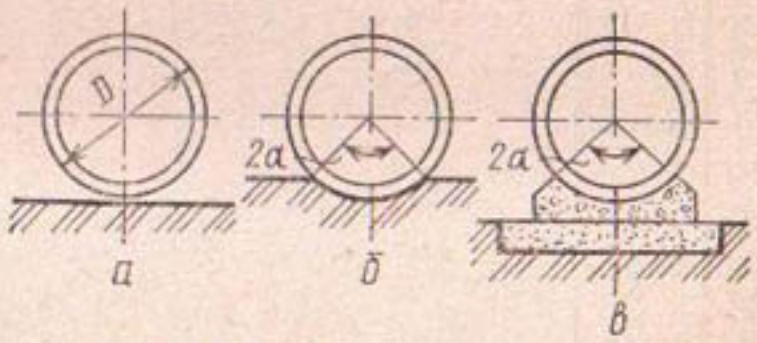
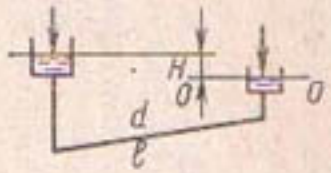
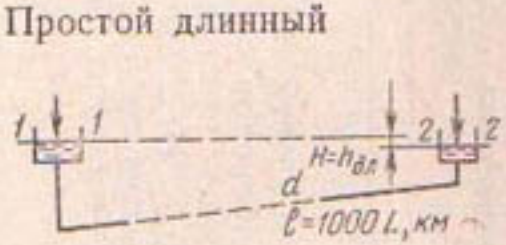
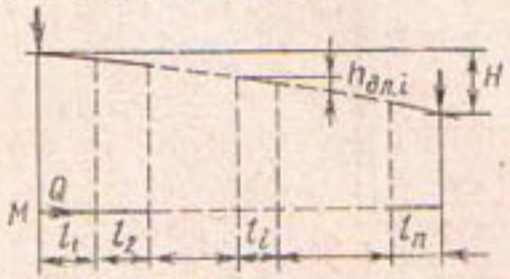


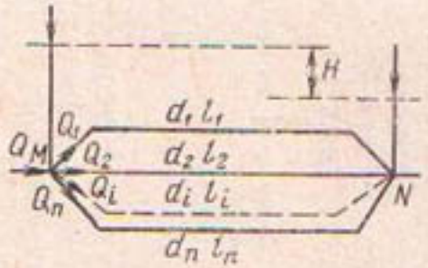
Рис. 6.19. Схемы поверхностной прокладки трубопроводов:

а — на плоское грунтовое основание; *б* — на грунтовое профилированное основание с углом охвата трубы 2α; *в* — на бетонный фундамент с углом охвата трубы 2α

6.38. Основные расчетные формулы для установившегося движения воды в трубопроводах

Схема и тип трубопровода	Расход, м³/с	Напор, м
Простой короткий 	$Q=\sqrt{H/[Al+0{,}81\,(1/d_2^4-1/d_1^4+\Sigma\xi_m/d_2^4)/g]}$	$H=H_1-H_2$ $H=Q^2[Al+0{,}81\,(1/d_2^4-1/d_1^4+\Sigma\xi_m/d_2^4)/g]$
Простой длинный 	$Q=K\sqrt{H/l}$	$H=h_l=Q^2l/K^2=AlQ^2$
С последовательно соединенными звеньями 	$Q=\text{const}$	$H=\sum_{i=1}^{n}H_i=Q^2\sum_{i=1}^{n}A_il_i$ $H_i=h_{li}$

С параллельно соединенными звеньями

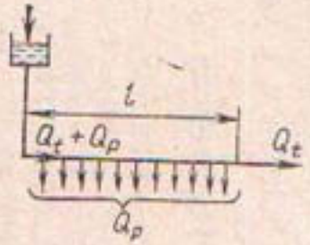


$$Q = \sum_{i=1}^{n} Q_i = \sqrt{H} \sum_{i=1}^{n} K_i / \sqrt{l_i}$$

$$Q_i = K_i \sqrt{H/l_i} = \sqrt{H/A_i l_i}$$

Разность пьезометрических напоров в точках M и N или $H = Q^2 / \sum_{i=1}^{n} K_i^2 / l_i$

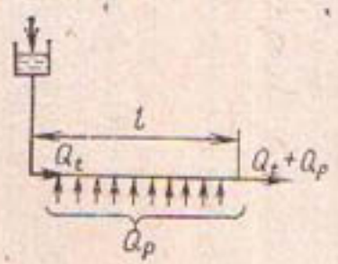
С непрерывной раздачей расхода по длине



$Q = Q_t + 0{,}55\, Q_p$,
где Q_t — транзитный расход; Q_p — общий раздаваемый расход

$H = Q^2 l / K^2$
при $Q_t = 0$ $H = Q_r^2 l / 3K^2$

С непрерывным притоком воды по длине



$Q = Q_t + 0{,}55\, Q_p$,
где Q_t — транзитный расход; Q_p — общий поступающий расход

$H = Q^2 l / K^2$
при $Q_t = 0$ $H = Q_p^2 l / 3K^2$

Примечание. A — удельное сопротивление трубопровода, определяемое по формуле (6.41); ξ_m — коэффициент местного сопротивления; K — расходная характеристика потока воды, $K = SC\sqrt{R}$. Значения A и ξ_m приводятся в гидравлических справочниках.

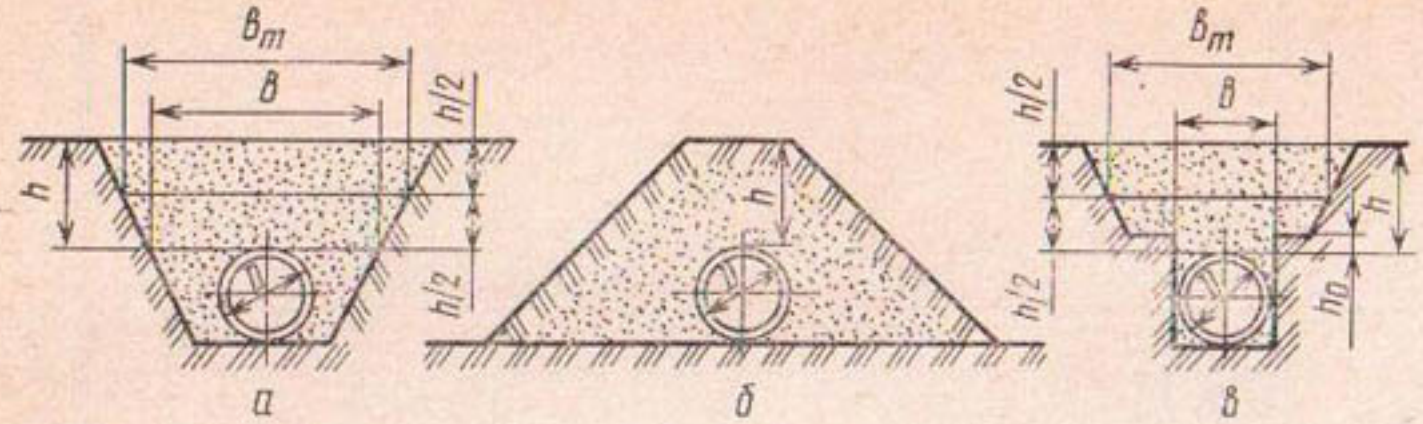


Рис. 6.20. Условия укладки подземных трубопроводов:

а — в траншею; *б* — в насыпь; *в* — в узкую прорезь в траншее; h — глубина заложения до верха трубы; b_m — ширина траншеи на уровне полуглубины заложения трубы; b — ширина траншеи (прорези) на уровне верха трубы; h_0 — заглубление трубы в прорезь; D — наружный диаметр трубы

ных трубопроводах оно сопровождается потерями напора по длине и местными потерями.

У *гидравлически длинных трубопроводов* потери по длине намного превышают местные, поэтому при проектировании определяют только потери напора по длине h_l, увеличивая их на 5...10% для учета местных потерь.

У *гидравлически коротких трубопроводов* при расчетах учитывают все виды потерь: $h_l+\Sigma h$.

Типы задач при гидравлическом расчете.

Тип 1. Определить расход трубопровода Q при заданном напоре H, материале и размерах трубопровода (l и d).

Тип 2. Определить напор в трубопроводе при заданных Q, l, d.

Тип 3. Определить требуемый диаметр трубопровода для пропуска заданного расхода Q при известных H, l и гидравлических характеристик потока и трубы.

Для решения задач первого и второго типа основные расчетные формулы при различных схемах трубопроводов представлены в таблице 6.38.

Для решения задач третьего типа исходят из значения удельного сопротивления трубопровода A:

$$A = 1/S^2C^2R = 8\lambda/g\pi^2d^5 = 0{,}0827\lambda/d^5, \qquad (6.41)$$

где λ — коэффициент гидравлического трения или коэффициент Дарси; S — площадь поперечного сечения трубопровода; C и R — коэффициент Шези и гидравлический радиус потока при полном наполнении.

Значения λ и A для труб различного материала приведены в справочниках по гидравлике. Из формулы (6.41) следует формула для определения диаметра трубопровода любого типа в первом приближении

$$d = \sqrt[5]{0{,}0827\lambda/A} = \sqrt[5]{0{,}0827H/lQ^2}\,. \qquad (6.42)$$

Увеличивая диаметр, можно значительно снизить потери напора (примерно в 30 раз при увеличении диаметра в 2 раза), что сократит затраты на электроэнергию для перекачки воды. Однако при этом резко возрастает стоимость строительства трубопровода. Окончательно наивыгоднейший диаметр определяют технико-экономическим расчетом с учетом стандартных размеров труб, выпускаемых промышленностью.

При неполном заполнении трубопровода расход и средняя скорость равны

$$Q = k_{rel}SC\sqrt{Ri}; \qquad v = v_{rel}C\sqrt{Ri}, \qquad (6.43)$$

где k_{rel} — относительная расходная характеристика, равная отношению расходных характеристик при неполном и полном наполнении; i — уклон дна русла; v_{rel} — относительная средняя скорость потока. Для наиболее распространенных круглых труб k_{rel} и v_{rel} принимают по рисунку 6.21, для других

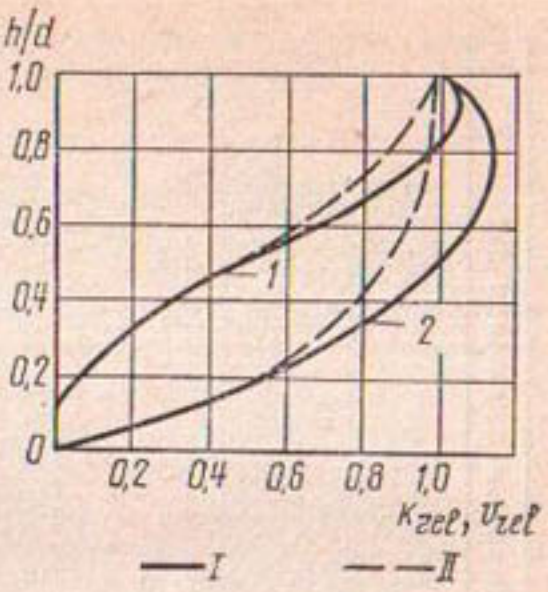


Рис. 6.21. Зависимость относительной расходной характеристики k_{rel} (*1*) и относительной средней скорости v_{rel} (*2*) от h/d для круглых труб:

h — глубина наполнения; d — внутренний диаметр трубы; *I* — теоретические значения; *II* — уточненные по экспериментальным данным

очертаний — по соответствующим графикам, приводимым в гидравлических справочниках.

Гидравлический удар в трубопроводах возникает при резком изменении режима потока в трубопроводе; быстром закрытии или открытии запорных и регулирующих устройств; внезапной остановке насоса или его пуске при открытом затворе на нагнетательной линии; выпуске воздуха через гидранты на оросительной сети при заполнении трубопроводов водой.

При быстром закрытии затвора гидравлический удар начинается с повышения давления, распространяющегося от затвора вверх по трубопроводу, сменяющееся затем волной понижения давления. При этом уменьшение скорости на 1 м/с приводит к росту давления в стальном трубопроводе, например, на 1...1,2 МПа.

При быстром открытии затвора гидравлический удар начинается волной понижения давления, сменяющейся его повышением. Эти колебания давления сопровождаются деформациями стенок трубопровода и могут вызывать отрицательные последствия, вплоть до разрыва стенок и аварий НС.

Добавочное давление Δp в напорном трубопроводе при мгновенном закрытии затвора определяют по формуле

$$\Delta p = \rho_w c v, \qquad (6.44)$$

где ρ_w — плотность воды, кг/м³; c — скорость распространения ударной волны, м/с; v — средняя скорость потока до закрытия затвора, м/с.

Скорость ударной волны для воды

$$c = 1425/\sqrt{1 + d/t\,(E_w/E)},$$

где d — внутренний диаметр трубы, м; t — толщина стенок трубы, м; E_w — модуль упругости воды, E_w=2030 МПа; E — модуль упругости материала трубы, МПа. Значения E_w/E для воды в трубах из различных материалов приведены ниже.

Сталь	0,1	Полиэтилен	1...1,5
Чугун	0,02	Винипласт	0,68...0,73
Железобетон	0,065...0,09	Стеклопластик	0,2...0,04
Бетон	0,1...0,14	Оргстекло	0,5...0,8
Асбестоцемент	0,11	Резина	120...350

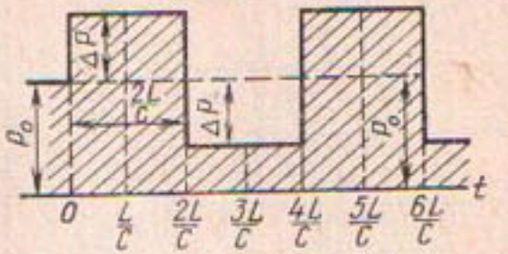
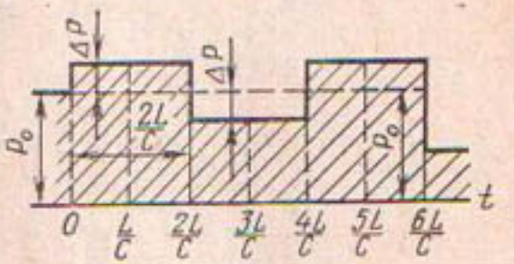
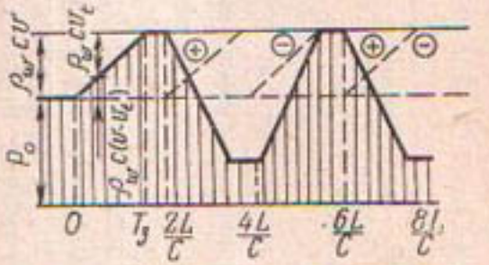
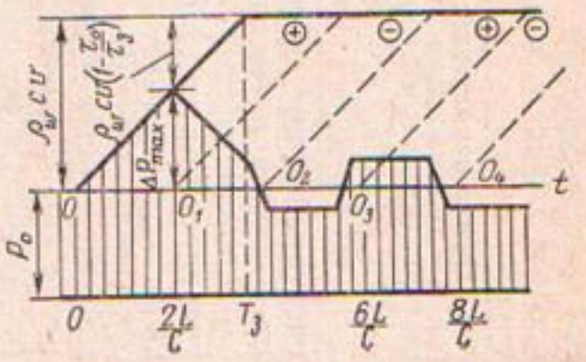
Полный период гидравлического удара охватывает две равные по времени фазы: повышения давления в трубопроводе от нормального p до $p+\Delta p$, а затем понижения до нормального (фаза гидравлического удара) и фазу понижения давления до $p-\Delta p$ с последующим ростом до нормального.

Каждая фаза продолжается время $\tau_0 = 2L/c$, а полный период $T = 2\tau_0 = 4L/c$, где L — полная длина трубопровода.

Частные случаи гидравлического удара при различных скоростях закрытия затвора рассмотрены в таблице 6.39.

Другим следствием гидравлического удара является образование воздушных пробок в трубопроводе при резком уменьшении давления, а также полостей со смесью пара и воздуха при падении давления вплоть до давления насыщенных паров жидкости при данной температуре, что приводит к разрыву сплошности потока. При последующем быстром сжатии полости с пониженным давлением массы жидкости соударяются. Развивающееся при этом

6.39. Гидравлический удар при различных скоростях закрытия затворов

Закрытие затвора	Изменение давления	Диаграмма изменения давления
Мгновенное: полное (скорость потока падает от v до 0)	$\Delta p=\rho_w cv$	
частичное (скорость падает от v до v_1)	$\Delta p=\rho_w c(v-v_1)$	
Постепенное: время закрытия $T_s<\tau_0$ (прямой гидравлический удар)	$\Delta p_t=\rho_w c(v-v_t)-v_t$ $\Delta p_{max}=\rho_w cv$ при $t=T_s$	
время закрытия $T_s>\tau_0$ (непрямой гидравлический удар)	$\Delta p_t=\rho_w c(v-v_t)$ $\Delta p_{max}=2\rho_w Lv/T_s$ при $t=\tau_0$ $v_t=v(1-t/T_s)$	

давление существенно превышает Δp, определенное по формуле (6.44), и по данным экспериментальных исследований достигает значений

$$\Delta p_1 = \rho c v + 1 \ldots 2p. \qquad (6.45)$$

Разрыв сплошности потока наиболее вероятен непосредственно у НС и в местах выпуклых переломов трассы трубопроводов.

Для защиты от гидравлического удара или смягчения его последствий на мелиоративных системах предусматривают специальные мероприятия или устройства (см. п. 8.5): сброс части жидкости из системы при повышении давления через специальные предохранительные клапаны, обводные линии-байпасы, медленно закрывающиеся обратные клапаны; впуск воды в трубопровод при понижении давления из бассейна через обратный клапан, предотвращающий разрыв сплошности потока; впуск и защемление воздуха с помощью специальных клапанов, устанавливаемых в местах возможного разрыва сплошности потока (например, сифонные водовыпуски НС). Защемленный воздух препятствует соударению разошедшихся масс воды при обратном движении. После гашения удара защемленный воздух удаляется из трубопровода. Устанавливают специальные воздушно-гидравлические колпаки, представляющие собой емкости для гашения гидравлического удара и сглаживания изменения скоростей.

6.7. РАСЧЕТ ТРУБОПРОВОДОВ НА ПРОЧНОСТЬ

За рабочее давление воды в трубопроводах оросительных систем принимают внутреннее максимально возможное по условиям эксплуатации давление, возникающее при установившемся режиме движения воды в наиболее неблагоприятных условиях подключения поливной техники.

При гидравлическом ударе за внутреннее давление воды принимают максимальное, возникающее при нестационарном режиме движения с учетом использования устройств, защищающих трубопровод от гидравлического удара.

Класс труб при проектировании оросительных систем в зависимости от условий эксплуатации трубопроводов выбирают на основании результатов расчета их по прочности и несущей способности для следующих сочетаний нагрузок: давление грунта и транспорта на опорожненный трубопровод; рабочее давление воды в трубопроводе, давление грунта и транспорта; давление воды в трубопроводе при гидравлическом ударе (или вакууме); давление грунта.

Нагрузки, действующие на трубопровод, приведены в таблице 6.40, а схемы их действия и расчетные формулы основных нагрузок — в таблице 6.41.

6.40. Основные нагрузки, действующие на трубопровод

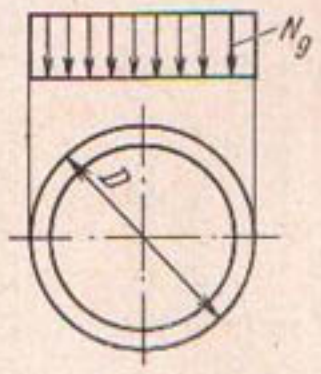
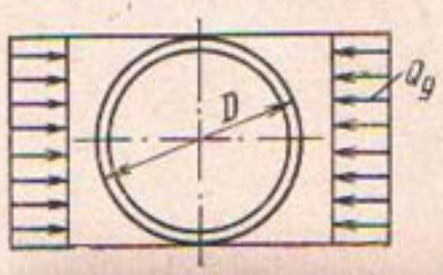
Постоянные	Временные		Особые
	длительные	краткие	
Собственный вес труб	Вес транспортируемой воды	Местное давление от транспорта	Внутреннее давление при гидравлическом ударе
Давление грунта	Рабочее давление воды	Внутреннее давление при испытаниях трубопроводов (испытательное давление)	Атмосферное давление при вакууме внутри трубы
Давление грунтовой воды	Поверхностная распределенная нагрузка		Сейсмическая нагрузка

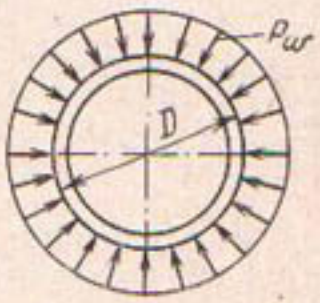
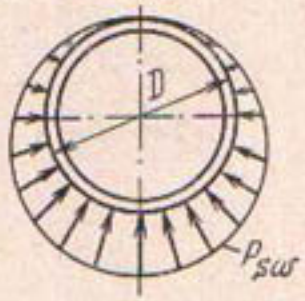
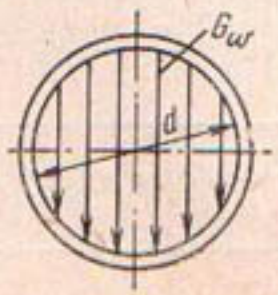
Эквивалентную расчетную приведенную нагрузку на трубопровод определяют по формуле

$$P_{eqv} = \beta \eta \Sigma N, \qquad (6.46)$$

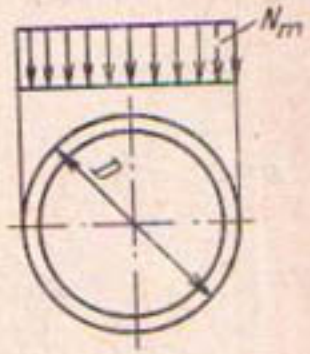
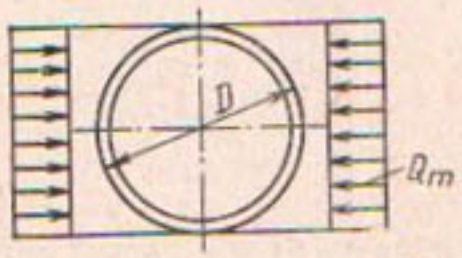
где β — коэффициент приведения, зависящий от способа укладки (табл. 6.50); η — коэффициент бокового давления, зависящий от вида грунта (табл. 6.51);

6.41. Схемы загружения и формулы определения основных расчетных нагрузок на трубопровод

Схема загружения	Расчетная удельная нагрузка, кПа на 1 м	Расчетные коэффициенты
Вес труб	$G_t=1{,}1\pi\gamma_t t(D+d)/2$	γ_t — удельный вес материала трубопровода, определяемый по таблице 6.42; t — толщина стенки трубопровода; D, d — наружный и внутренний диаметры трубы
Вертикальное давление грунта 	Укладка в траншею (см. рис. 6.20, *а*) при $bk_{tr}\Psi<Dk_n$ $N_g=1{,}15\,\gamma hbk_{tr}\Psi$; при $bk_{tr}\Psi>Dk_n$ см. укладку в насыпи. Укладка в насыпи (см. рис. 6.20, *б*) $N_g=1{,}15\gamma hDk_n$ Укладка в прорезь (см. рис. 6.20, *в*) $N_g=1{,}15\gamma hb_m k_{pr}$	γ — удельный вес грунта засыпки, определяемый по таблице 6.43; h — заглубление верха трубы в грунт; b — ширина траншеи над трубой, прорези; k_{tr} — коэффициент зависания грунта, определяемый по таблице 6.44; k_n — коэффициент концентрации давления грунта, определяемый по таблице 6.45; Ψ — коэффициент разгрузки давления грунта в пазухах, $\Psi=1/[1+2(p_g/p_t)(b-D)/\chi D)]$, где p_g и p_t см. табл. 6.45; χ — коэффициент, учитывающий вид основания, $\chi=0{,}9$ при плоском основании; 0,85 — при профилированном с $2\alpha=90°$ и 0,75 — с $2\alpha=120°$
Боковое давление грунта 	Укладка в траншею $Q_g=0{,}8\gamma hDk_{tr}\lambda_{tr}\chi$ Укладка в насыпь $Q_g=0{,}8\gamma(h+0{,}5D)D\lambda_n$ Укладка в прорезь Q_g не учитывают	k_{pr} — коэффициент концентрации давления при укладке в прорезь, определяемый по таблице 6.46; λ_{tr}, λ_n — коэффициенты концентрации горизонтальной нагрузки, определяемые по таблице 6.47

Давление грунтовой воды  	$p_w=1{,}1\gamma_w H_w$	H_w — высота столба грунтовой воды над верхом трубопровода
Взвешивающее давление грунтовой воды  	$p_{sw}=n\pi/4\gamma_w D^2$	n — коэффициент перегрузки, $n=0{,}9$ при расчете на прочность и 1,1 — при расчете на всплытие
Вес транспортируемой воды  	$G_w=\pi/4\gamma_w d^2$	$\gamma_w=9{,}8$ кН/м³ для пресной воды; 10,1 кН/м³ — для морской; 10,4 кН/м³ — для сточной жидкости

Продолжение

Схема загружения	Расчетная удельная нагрузка, кПа на 1 м	Расчетные коэффициенты
Вертикальная нагрузка от транспорта 	$N_m=nQ_{mh}$ $Q_{m,h}=q_{m,h}D\mu k_n$	$n=1{,}4$ автомобильный транспорт $n=1$, колесный и гусеничный транспорт μ — коэффициент динамичности подвижной нагрузки, определяемый по таблице 6.48; $q_{m,h}$ — нормативная интенсивность давления от транспорта, определяемая по таблице 6.49
Горизонтальная нагрузка от транспорта 	$Q_g=q_{m,h}D\lambda_n\chi$	$n=1$ для любого транспорта

6.42. Нормативный удельный вес материала трубопровода

Материал трубопровода	Удельный вес γ_f, кН/м³
Бетон:	
вибрированный или центрифугированный	23,3
невибрированный	22,3
Железобетон:	
вибрированный или центрифугированный	24,2
невибрированный	23,3
Асбестоцемент	18,4
Керамика	18,4

6.43. Нормативные характеристики грунтов засыпки

Грунт засыпки	Плотность грунта ρ, т/м³	Удельный вес γ грунта, кН/м³	Модуль деформации грунтов E_g, МПа, при степени уплотнения		
			нормальной	повышенной	плотной (при намыве)
Пески гравелистые крупные и средней крупности	1,70	16,7	7,8	15,7	25,5
Пески мелкие	1,70	16,7	5,9	11,8	17,6
Пески пылеватые	1,70	16,7	3,9	7,4	9,8
Супеси	1,80	17,7	2,4	4,9	7,0
Суглинки	1,85	18,1	2,0	3,9	—
Глины	1,90	18,6	1,2	2,4	—

Примечание. Для всех грунтов, кроме глин, при заложении трубопроводов ниже постоянного УГВ принимают плотность грунта с учетом взвешивания, для глин в расчете вводится их плотность в насыщенном водой состоянии.

6.44. Коэффициент зависания грунта на стенках траншеи k_{tr} в зависимости от грунта засыпки

h/b	Пески, кроме пылеватых	Пески пылеватые, супеси, суглинки	Глины	h/b	Пески, кроме пылеватых	Пески пылеватые, супеси, суглинки	Глины
0	1,000	1,000	1,000	2	0,725	0,750	0,780
0,2	0,962	0,968	0,974	3	0,630	0,660	0,690
0,4	0,928	0,937	0,948	4	0,555	0,585	0,620
0,6	0,896	0,910	0,925	5	0,490	0,520	0,560
0,8	0,867	0,883	0,902	6	0,435	0,470	0,505
1,0	0,839	0,862	0,882	7	0,390	0,425	0,460
1,2	0,816	0,840	0,865	8	0,350	0,385	0,425
1,4	0,796	0,823	0,849	9	0,315	0,350	0,390
1,6	0,778	0,809	0,835	10	0,290	0,320	0,360
1,8	0,750	0,775	0,800	15	0,195	0,220	0,255

6.45. Коэффициент концентрации давления k_n для жестких труб при $h/D \geqslant 2{,}5$ и разных способах их укладки на основание

Грунты	Плоское грунтовое	Профилированное грунтовое с углом охвата 2α			Бетонное с углом охвата 2α=120°
		75°	90°	120°	
Скальные; глинистые очень прочные	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6
Пески гравелистые плотные; глинистые прочные	1,4	1,43	1,45	1,47	1,5
Пески гравелистые средней плотности; пески пылеватые плотные; глинистые средней плотности	1,25	2,28	1,3	1,35	1,4
Пески гравелистые рыхлые; пески пылеватые средней плотности; глинистые слабые	1,1	1,15	1,2	1,25	1,3
Пески пылеватые рыхлые; глинистые грунты текучие	1,0	1,0	1,0	1,05	1,1

Примечания. 1. При $h/D<0{,}5$ $k_n=1$ для всех видов грунта; при $0{,}5<h/D<2{,}5$ вместо k_n вводят коэффициент $k_n'=1{,}04[k_n-0{,}04-(k_n-1)D^2/4h^2]$. 2. При устройстве свайного основания под трубопроводом $k_n=1{,}6$ независимо от вида грунта. 3. Для гибких труб (стальных, полиэтиленовых) $k_n=1{,}5(p_t+p_g)/(p_t+2p_g)$, где p_t и p_g — параметры жесткости трубопровода и грунта засыпки, МПа; $p_t=[2E/(1-\nu^2)][t/(D-t)]^3$, $p_g=0{,}125E_g$. Модуль упругости E и коэффициент Пуассона ν для асбестоцементных труб равны соответственно $2\cdot10^4$ МПа и 0,2; для бетонных и железобетонных — $3\cdot10^4$ МПа и 0,16; для керамических — $1{,}5\cdot10^4$ МПа и 0,1. Модуль деформации засыпки E_g приведен в таблице 6.43.

6.46. Коэффициент концентрации давления грунта k_{gr} при укладке трубопровода в прорезь

Относительное заглубление трубы в прорезь h_0/D					
0	0,1	0,3	0,5	0,7	1
1	0,83	0,71	0,63	0,57	0,52

6.47. Коэффициенты концентрации давления от горизонтальной нагрузки при различной степени уплотнения засыпки

Грунт засыпки	Нормальная		Повышенная и плотная (при намыве)	
	λ_{tr}	λ_n	λ_{tr}	λ_n
Пески, кроме пылеватых	0,1	0,3	0,3	0,5
Пески пылеватые, супеси, суглинки	0,05	0,2	0,25	0,4
Глины	0,0	0,1	0,2	0,3

6.48. Коэффициент динамичности подвижной нагрузки μ в зависимости от высоты засыпки трубопровода

Высота засыпки h, м					
0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
1,17	1,14	1,10	1,07	1,04	1,0

6.49. Нормативная интенсивность давления от транспорта $q_{m,h}$ до глубины 2...3 м, кПа

Глубина прокладки h, м	Диаметр трубопровода D, м						
	0,1	0,3	0,5	0,7	0,9	1,1	>1,3
			Колесная нагрузка НК-80				
0,5	136,0	128,7	123,8	116,6	113,5	104,9	101,0
0,75	106,7	101,9	98,4	93,8	92,0	88,9	85,1
1,0	77,5	74,9	73,3	71,1	70,9	70,1	69,6
1,25	56,4	55,2	54,3	53,1	52,9	52,6	52,1
1,5	35,4	35,3	35,2	35,1	35,0	34,9	34,8
1,75	30,9	30,9	30,8	30,7	30,6	30,5	30,4
2,0	26,5	26,5	26,4	26,4	26,3	26,2	26,1
			Гусеничная нагрузка НГ-60				
0,5	—	59,8	58,8	56,9	54,9	52,0	49,0
0,75	—	44,1	43,3	42,7	41,7	40,9	40,2
1,0	—	35,3	34,8	32,4	34,3	34,3	34,3
1,25	—	29,8	29,8	29,8	29,8	29,8	29,8
1,5	—	—	—	25,4	—	—	—
1,75	—	—	—	21,7	—	—	—
2,0	—	—	—	18,7	—	—	—
			Автомобильная нагрузка Н-30				
0,5	—	111,1	104,7	92,9	80,9	76,8	77,3
0,75	—	56,4	53,1	49,8	46,2	42,5	39,2
1,0	—	29,9	29,2	28,2	27,2	25,9	24,5
1,25	—	21,5	21,3	20,4	20,0	19,4	19,2
1,5	—	16,3	16,1	15,9	15,9	15,9	15,9
1,75	—	14,5	14,4	14,3	14,1	14,0	13,8
2,0	—	13,0	12,8	12,6	12,6	12,4	12,2
2,25	—	11,8	11,6	11,5	11,3	11,1	10,9
2,5	—	10,5	10,4	10,2	10,1	9,9	9,71
3,0	—	8,53	8,43	8,34	8,24	8,14	8,04
			Автомобильная нагрузка Н-18				
0,5	—	111,1	104,0	92,9	83,2	75,9	69,1
0,75	—	51,9	48,2	46,6	42,9	40,0	38,0
1,0	—	28,1	27,2	25,6	24,5	23,0	21,6
1,25	—	18,3	17,8	17,5	16,9	16,3	15,6
1,5	—	13,4	13,3	13,1	12,9	12,8	12,7
1,75	—	11,0	10,9	10,8	10,7	10,6	10,6
2,0	—	—	8,43	—	—	—	—

Автомобильная нагрузка Н-10

	0,3	0,4	0,45	0,5	>0,6
0,5	58,6	54,5	—	51,8	48,8
0,75	27,9	27,0	—	26,2	25,4
1,0	16,5	16,2	—	15,9	15,6
1,25	—	—	11,0	—	—
1,5	—	—	8,14	—	—
1,75	—	—	6,57	—	—
2,0	—	—	5,39	—	—
2,25	—	—	4,71	—	—
2,5	—	—	4,12	—	—
2,75	—	—	3,63	—	—
3,0	—	—	3,14	—	—

6.50. Коэффициент приведения β для нагрузок

Способ укладки труб (см. рис. 6.19)	При давлении грунта и временных нагрузках	При весе трубопровода и воды
На плоское грунтовое основание с подбивкой засыпки под круглые трубы	0,75	0,60
На грунтовое спрофилированное основание с углом охвата трубы:		
$2\alpha=75°$	0,55	0,37
$2\alpha=90°$	0,50	0,32
$2\alpha=120°$	0,45	0,25
На железобетонный фундамент с углом охвата трубы $2\alpha=120°$	0,35	0,20

6.51. Коэффициент бокового давления η для расчета эквивалентной приведенной нагрузки на трубопровод

Грунт засыпки	Уплотнение нормальное		Уплотнение повышенное и плотное с помощью намыва	
	в траншее	в насыпи	в траншее	в насыпи
Пески, кроме пылеватых	0,95	0,86	0,86	0,78
Пески пылеватые, супеси, суглинки	0,97	0,90	0,88	0,82
Глины	1,00	0,95	0,90	0,86

ΣN — сумма вертикальных сил от грунта, транспорта, веса трубопровода и воды в нем.

Задачи прочностных расчетов для труб из различных материалов:

для жестких труб (железобетонные, бетонные, асбестоцементные и др.), где деформация стенок труб до разрушения не вызывает существенного перераспределения действующих усилий, предельным состоянием трубы является разрушение ее стенок;

для гибких труб (стальные тонкостенные, полиэтиленовые и т. п.), где деформация стенок труб до разрушения вызывает заметное перераспределение действующих усилий, предельным состоянием трубы является потеря ее стенками поперечной устойчивости, для пластмассовых труб, кроме этого, учитывают изменение с течением времени свойств материала (уменьшение прочности и снижение модуля упругости материала).

В результате расчета для каждого сочетания нагрузок выбирают класс труб. В проекте принимают наиболее высокий класс среди полученных вариантов.

6.7.1. РАСЧЕТ БЕЗНАПОРНЫХ АСБЕСТОЦЕМЕНТНЫХ, БЕТОННЫХ И КЕРАМИЧЕСКИХ ТРУБОПРОВОДОВ

Безнапорные асбестоцементные, бетонные и керамические трубопроводы рассчитывают по прочности и несущей способности на совместное воздействие расчетных нагрузок от давления грунта, временных нагрузок, собственного веса и веса транспортируемой воды, исходя из сочетания их для расчетного случая по следующей формуле

$$P_{eqv} \leqslant P_{lim}\gamma_c/\gamma_n, \qquad (6.47)$$

6.52. Контрольная нагрузка P_{1lm} на 1 м трубы для асбестоцементных безнапорных труб (ГОСТ 1839—80), кН

Группа прочности по несущей способности	Условный диаметр D_y, мм				
	100	150	200	300	400
1 (нормальная прочность)	22,54	19,6	15,68	20,58	24,5
2 (повышенная прочность)	26,27	22,84	18,23	24,01	26,27

6.53. Контрольная нагрузка P_{1lm} на 1 м длины трубы для бетонных безнапорных труб (ГОСТ 20054—82), кН

Группа прочности по несущей способности	Условный диаметр D_y, мм								
	100	150	200	300	400	500	600	800	1000
1 (нормальная прочность)	15,7	16,7	18,6	28,4	34,3	38,2	42,2	51,0	57,8
2 (повышенная прочность)	—	—	—	39,2	47,1	53,9	60,8	74,5	88,3

6.54. Контрольная нагрузка P_{1lm} на 1 м длины трубы для керамических канализационных труб (ГОСТ 286—82) (с коэффициентом 0,8, учитывающим снижение прочности труб в замоченном состоянии), кН

Категория качества труб	Условный диаметр D_y, мм									
	150	200	250	300	350	400	450	500	550	600
Обычная	20	20	20	25	25	25	25	30	30	30
Высшая	24	24	24	32	32	32	32	35	35	35

6.55. Расчетное отношение γ_c/γ_n при расчете на прочность для безнапорных трубопроводов

Трубопровод	Класс труб		
	I	II	III
Асбестоцементный	0,69	0,73	0,77
Бетонный	—	0,73	0,73
Керамический	0,6	0,63	0,67

где P_{1qv} — суммарная действующая расчетная эквивалентная нагрузка на трубу, приведенная к двум диаметрально противоположным линейным нагрузкам; P_{1lm} — контрольная раздавливающая линейная нагрузка, которую трубы выдерживают без разрушения (табл. 6.52...6.54); γ_c — суммарный коэффициент условий работы трубопровода; γ_n — коэффициент надежности труб (табл. 6.55).

Для безнапорных трубопроводов из указанных труб, как правило, наиболее опасным сочетанием нагрузок является случай, когда действует максимальная временная нагрузка от транспорта.

6.7.2. РАСЧЕТ НАПОРНЫХ АСБЕСТОЦЕМЕНТНЫХ И ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ТРУБОПРОВОДОВ

Напорные асбестоцементные трубы рассчитывают на совместное действие давления грунта, временных нагрузок, собственного веса, веса транспортируемой воды и ее внутреннего давления для различных сочетаний по формуле

$$P_{eqv} \leqslant \gamma_c P_{IIm} \nu / \gamma_n, \qquad (6.48)$$

где γ_c — коэффициент условий работы для оросительной сети, $\gamma_c = 0{,}89$, при отсутствии заводских испытаний на разрушение $\gamma_c = 0{,}67$; P_{IIm} — контрольная внешняя нагрузка (табл. 6.56); γ_n — коэффициент надежности труб, для асбестоцементных $\gamma_n = 2{,}3$; ν — поправочный коэффициент на внутреннее гидравлическое давление воды, принимаемый в зависимости от отношения $\gamma_n P / \gamma_c P'_{IIm}$ [где P — расчетное внутреннее давление в трубопроводе; P'_{IIm} —

6.56. Контрольная линейная приведенная внешняя нагрузка P_{IIm} (кН) напорных асбестоцементных труб (ГОСТ 539—80)

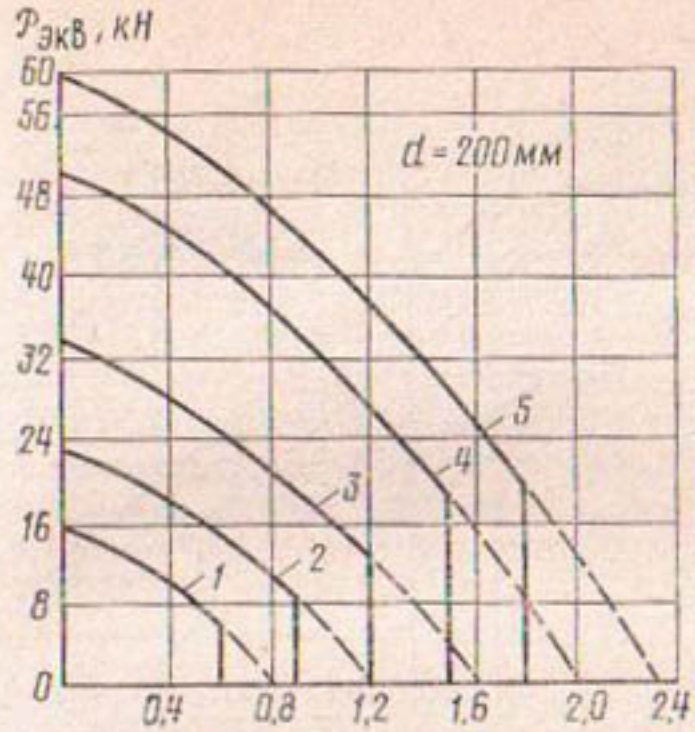
D_y, мм	ВТ 6	ВТ 9	ВТ 12	ВТ 15
100	40	55	65	—
150	40	55	75	—
200	40	60	85	130
250	40	65	95	125
300	45	70	110	150
350	55	80	125	175
400	75	90	145	195
500	80	110	170	195

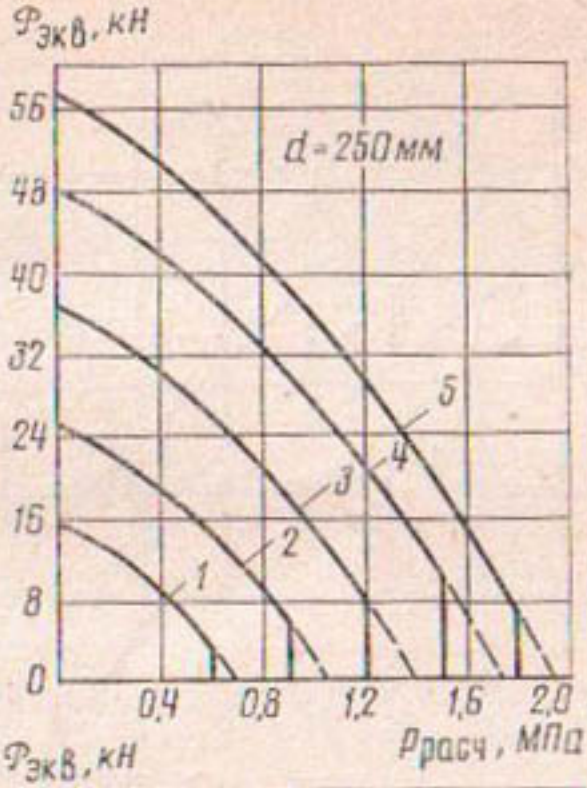
6.57. Контрольное испытательное гидравлическое давление P'_{IIm} (МПа) для асбестоцементных труб (ГОСТ 539—80) первой и высшей категории

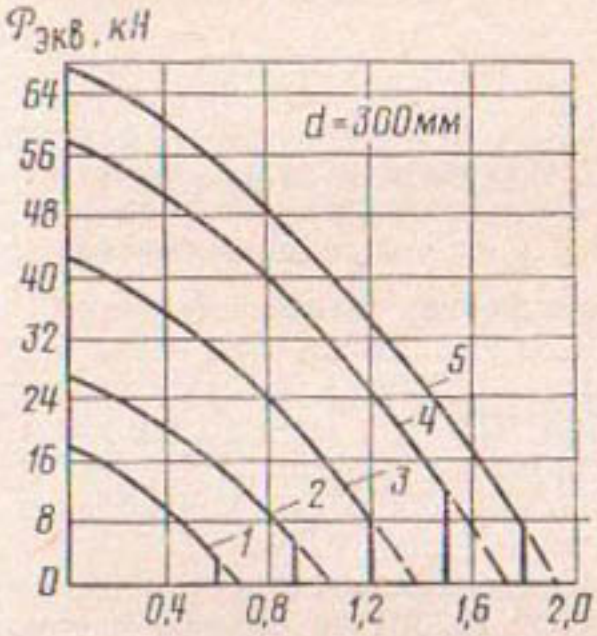
D_y, мм	ВТ 6	ВТ 9	ВТ 12	ВТ 15
100	2,4; 2,6	3,6; 3,8	4,8; 5,0	—
150...200	2,1; 2,3	3,1; 3,2	4,2; 4,3	5,2; 5,3
250...500	1,8; 2,0	2,7; 2,8	3,6; 3,7	4,5; 4,6

6.58. Контрольная нагрузка на 1 м длины P_{max} (кН) и допустимое давление P_{adm} (МПа) для напорных железобетонных виброгидропрессованных труб из условия недопущения трещин (ГОСТ 125860—83 и 125861—83)

Условный диаметр D_y, мм	0 класс		I класс		II класс		III класс	
	P_{max}	P_{adm}	P_{max}	P_{adm}	P_{max}	P_{adm}	P_{max}	P_{adm}
500	122	2,65	99	2,15	75	1,65	—	—
600	142	2,65	115	2,15	88	1,65	—	—
800	—	—	1,25	2,3	98	1,8	7,1	1,3
1000	—	—	150	2,4	118	1,9	86	1,4
1200	—	—	172	2,4	137	1,9	102	1,4
1400	—	—	200	2,45	159	1,95	118	1,45
1600	—	—	222	2,45	177	1,95	132	1,45







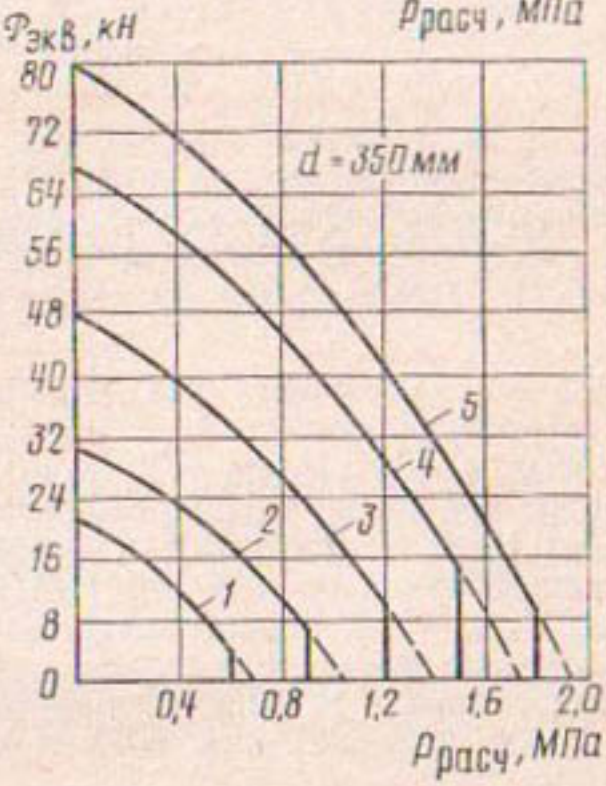


Рис. 6.22. Несущая способность асбестоцементных труб:
1 — ВТ 6; *2* — ВТ 9; *3* — ВТ 12; *4* — ВТ 15; *5* — ВТ 18

контрольное испытательное гидравлическое давление (табл. 6.57)] следующие значения:

$\gamma_n P/\gamma_c P_{lim}$	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1
ν	1	0,952	0,893	0,822	0,739	0,645	0,539	0,422	0,293	0,152	0

Графики несущей способности наиболее часто употребляемых асбестоцементных труб при $\gamma_c = 0{,}89$ даны на рисунке 6.22.

Напорные железобетонные трубы (виброгидропрессованные, центрифугированные, со стальным сердечником) рассчитывают на совместное действие давления грунта, временных нагрузок от транспорта, собственного веса, веса транспортируемой воды и гидравлического давления для различных их сочетаний. Расчет проводят на трещиностойкость, исходя из одного из условий при $\gamma_n = 1$,

$$P_{eqv} \leqslant \gamma_c P_{max} \psi_H [1 - P/(\gamma_c P_{adm})]$$

или

$$P \leqslant \gamma_c P_{adm} \psi_H [1 - P_{eqv}/(\gamma_c P_{max} \psi_H)], \qquad (6.49)$$

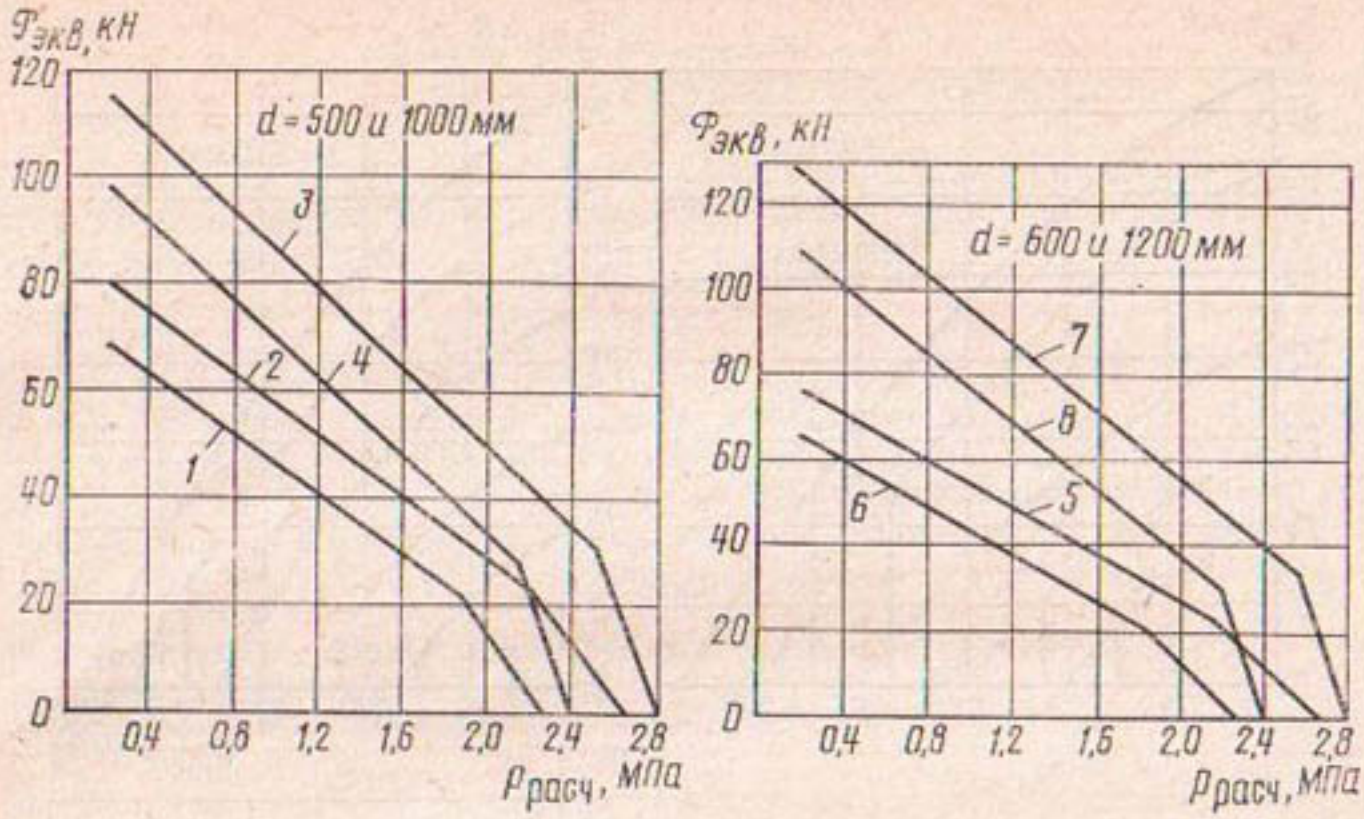


Рис. 6.23. Несущая способность железобетонных напорных виброгидропрессованных труб:

1 — РТН 50-*II*; *2* — РТН 50-*I*; *3* — РТН 100-*I*; *4* — РТН 100-*II*; *5* — РТН 60-*I*; *6* — РТН 60-*II*; *7* — РТН 120-*I*; *8* — РТН-*I*

где $\Psi_н$ — коэффициент, учитывающий повышение трещиностойкости труб за счет расправляющего действия внутреннего давления P и отпора грунтовой засыпки, $\Psi_н = 1 + (p_g + P)/(p_t + 0{,}1p_g)$ [p_t — параметр жесткости железобетонного напорного трубопровода, $p_t = 2{,}05Et^3/(D-t)^3$; p_g — то же для грунта, $p_g = 0{,}125E_g$ (табл. 6.43); E — модуль упругости материала трубопровода, для железобетона равный $3 \cdot 10^4$ МПа]; P_{max} — наибольшая контрольная нагрузка; P_{adm} — допустимое внутреннее давление (табл. 6.58).

Расчетное внутреннее гидравлическое давление в железобетонном напорном трубопроводе P, определенное по формуле (6.49), не должно превышать следующих значений: для труб 0 класса — 2 МПа; I — 1,5; II — 1; III — 0,5 МПа.

При обосновании допускают использование труб I, II, III классов на внутренние давления, превышающие указанные на 0,3 МПа.

Графики прочности некоторых видов железобетонных труб, показывающие характер изменения их прочности в зависимости от действующих нагрузок, приведены на рисунке 6.23.

6.7.3. РАСЧЕТ СТАЛЬНЫХ ТОНКОСТЕННЫХ ТРУБОПРОВОДОВ

Стальные трубопроводы оросительных систем рассчитывают на прочность для следующих сочетаний нагрузок: при действии одного внутреннего давления; при действии внешних нагрузок (в том числе с учетом образования вакуума) на опорожненный трубопровод; при совместном действии внешней нагрузки и внутреннего давления. Кроме того, проверяют деформируемость и устойчивость на сплющивание при действии внешних нагрузок на опорожненный трубопровод. К внешним нагрузкам относится и атмосферное давление при образовании вакуума в трубопроводе.

Прочность при действии одного внутреннего давления обеспечивается при допустимом внутреннем давлении

$$P_{adm} = 2Rt\gamma_c/D, \qquad (6.50)$$

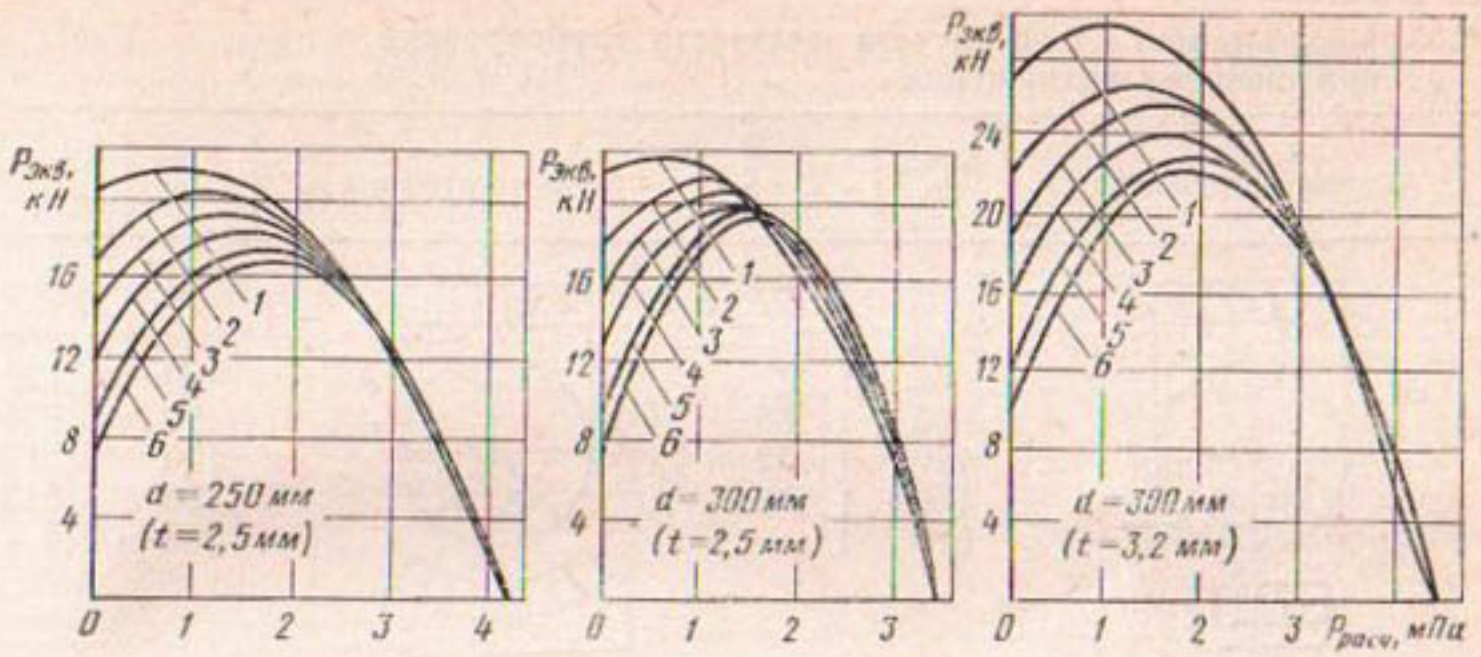


Рис. 6.24. Несущая способность стальных труб при различном модуле деформации грунта:
1 — 15 МПа; *2* — 10; *3* — 7,5; *4* — 5; *5* — 2,5; *6* — 1,2

где γ_c — коэффициент условия работы трубопровода, равный 0,9, при испытаниях $\gamma_c = 1$; R — расчетные сопротивления стали растяжению, сжатию, изгибу, $R = \sigma_L/\gamma_m$. Для растянутых элементов конструкций, эксплуатация которых возможна и после достижения металлом предела текучести, расчетные сопротивления определяют по формуле

$$R_\tau = \sigma_\tau/1{,}3\gamma_m \geqslant R,$$

где σ_L и σ_τ — временное сопротивление и предел текучести стали, принимаемые по государственным стандартам или техническим условиям на сталь; γ_m — коэффициент безопасности по материалу, равный 1,1 для углеродистых и низколегированных сталей, соответствующих ГОСТ 380—71 и ГОСТ 19281(2)—73.

Прочность при внешнем нагружении обеспечивается при допустимой внешней приведенной нагрузке с учетом атмосферного давления $P_{eqv} \leqslant F_{adm,a}$; $P_{eqv} \leqslant F_{adm}$;
при образовании вакуума

$$F_{adm,a} = Rt^2/1{,}908\xi_a r; \qquad (6.51)$$

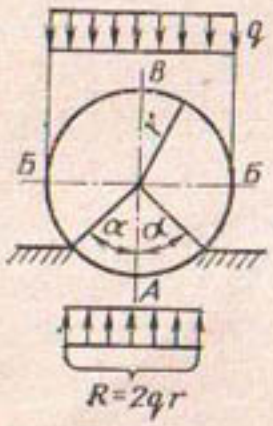
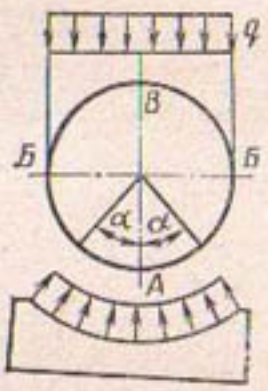
без образования вакуума $F_{adm} = Rt^2/1{,}908\xi r$, где ξ и ξ_a — коэффициенты отпора грунта засыпки, равные $\xi = [1 + p_g/(p_t + 0{,}143)p_g]^{-1}$. $\xi_a = [1 + (p_g - p_a)/(p_t + 0{,}143p_g)]^{-1}$ [p_g — параметр жесткости грунта, $p_g = 0{,}125E_g$; E_g — модуль деформации грунта, определяемый по таблице 6.47; p_a — атмосферное давление; p_t — параметр жесткости трубы для стали, $p_t = Et^3/4(1 - \nu^2)r^3$], где E и ν соответственно модуль упругости и коэффициент Пуассона материала трубы.

Прочность при совместном действии внешней нагрузки и внутреннего давления обеспечена при условии

$$P_{eqv} \leqslant (1 - P/P_{adm})\, F_{adm}/(\xi - \pi t/12\beta r), \qquad (6.52)$$

где P_{adm} и F_{adm} определяют соответственно по формулам (6.50) и (6.51); r — радиус трубы. Соотношение (6.52) определяет кривые, ограничивающие области допускаемых расчетных сочетаний внутреннего давления и внешних нагрузок на стальные трубы (рис. 6.24).

6.59. Коэффициент f для расчета жесткости трубопровода при внешнем нагружении

Схема нагружения	Угол 2α	f	Схема нагружения	Угол 2α	f
	0	1,392		0	1,392
	30	1,3		30	1,285
	60	1,23		60	1,125
	90	1,155		90	0,974
	120	1,082		120	0,817
	150	1,033		150	0,643
	180	1		180	0,5

Жесткость опорожненного трубопровода при внешнем нагружении определяют из условия: относительное уменьшение вертикального диаметра f/d не должно превышать 3%. Оно соблюдается при

$$N = 0{,}15Dp_t/f\xi, \qquad (6.53)$$

где f — коэффициент, учитывающий распределение вертикальной нагрузки и опорной реакции основания (табл. 6.59). При учете влияния активного бокового давления ($Q_g = 0{,}3N$) в формулу (6.53) вместо f вводят $f = f - 0{,}3$. Для учета вакуума в трубопроводе ξ в формуле (6.53) заменяют на ξ_a.

Устойчивость на сплющивание при внешнем нагружении опорожненного трубопровода проверяют по критическому внешнему давлению

$$P_{cr} = \sqrt{p_t p_g}. \qquad (6.54)$$

6.7.4. ОСОБЕННОСТИ РАСЧЕТА ПЛАСТМАССОВЫХ ТРУБОПРОВОДОВ

Прочностные и деформационные характеристики пластмассовых труб резко изменяются в зависимости от температуры. Прочность поливинилхлорида (ПВХ) при низких температурах увеличивается, а деформационная способность его резко снижается, так как материал становится хрупким. Ударная вязкость ПВХ при 0 °С составляет 65%, а при минус 20 °С — только 35% ее значения при плюс 20 °С. Поэтому в пластмассовых трубопроводах не допускается замерзание жидкости и воздействие ударных нагрузок.

6.60. Характеристики пластмассовых труб: расчетное сопротивление и модуль упругости при 30 °С в зависимости от возраста труб

Материал труб	Возраст труб, лет				
	0	5	15	25	50
Полиэтилен низкой плотности	35; 1500	34; 610	31; 580	28; 570	25; 550
Полиэтилен высокой плотности	65; 5000	63; 2060	58; 1960	55; 1900	50; 1850
Поливинилхлорид	180; 20 000	120; 13 000	100; 12 300	82; 12 000	57; 11 600

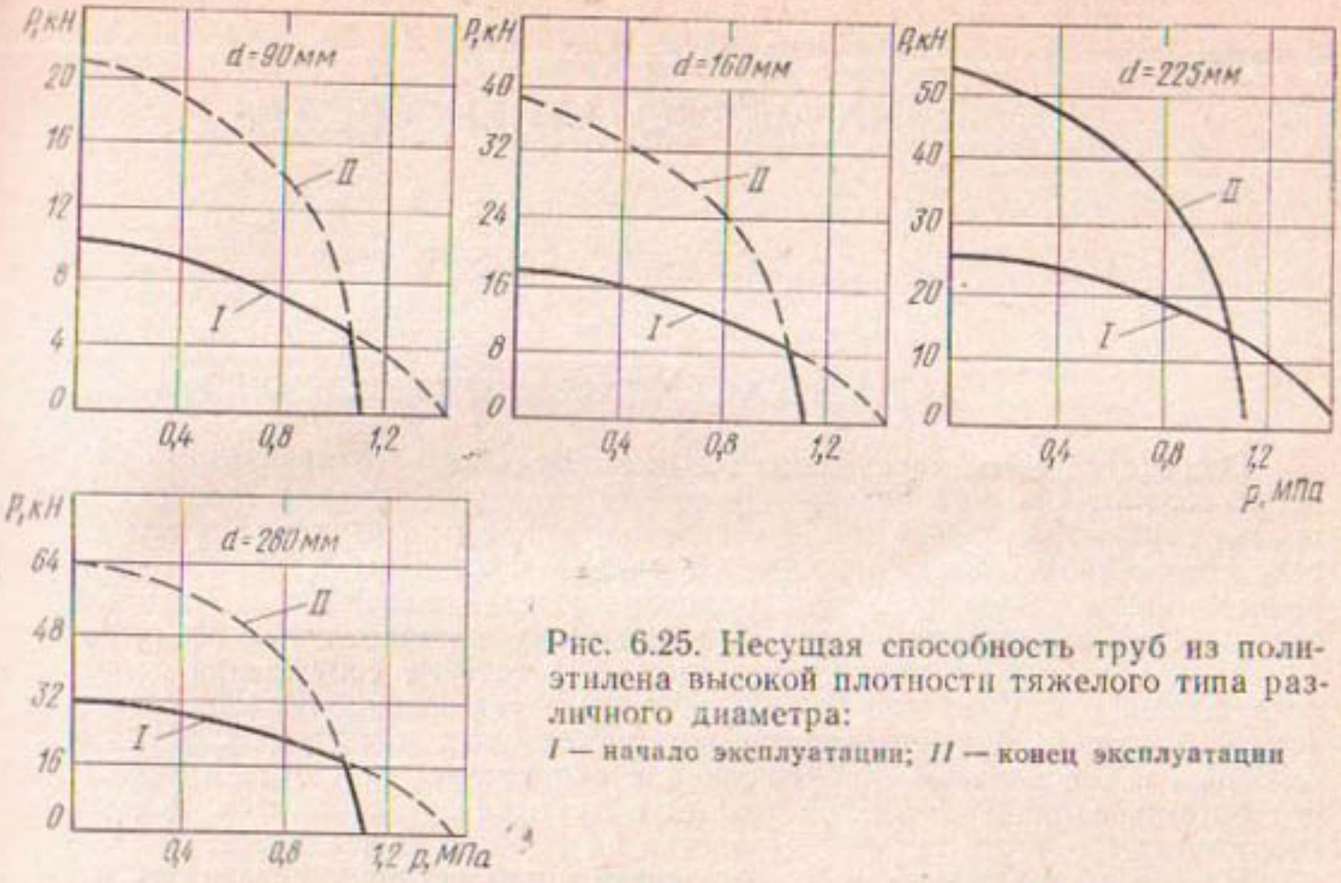


Рис. 6.25. Несущая способность труб из полиэтилена высокой плотности тяжелого типа различного диаметра:
I — начало эксплуатации; *II* — конец эксплуатации

Для полиэтилена характерно сохранение упругих свойств при отрицательных температурах, что создает значительно меньшую вероятность разрушения трубопровода при замерзании в нем воды. Полиэтиленовые трубы сохраняют гибкость даже при температуре минус 30...60 °С. Пластмассовые трубы с течением времени теряют прочность, а модуль их упругости снижается (табл. 6.60).

При расчете пластмассовых труб необходимо учитывать изменение прочности и жесткости материала на начало и конец эксплуатации, резко снижающее их несущую способность (рис. 6.25).

Глава 7 СООРУЖЕНИЯ НА МЕЛИОРАТИВНОЙ СЕТИ

7.1. КЛАССИФИКАЦИЯ СООРУЖЕНИЙ

Гидротехнические сооружения на мелиоративной сети предназначены для регулирования объемов подачи или отвода воды, обеспечения требуемых режимов водораспределения и водоотведения, защиты водоводов, внутрисистемных резервуаров и водохранилищ от занления, размыва и других вредных воздействий, а также для предотвращения ущерба хозяйственной деятельности человека и природной среде от возводимых мелиоративных объектов.

В зависимости от назначения (табл. 7.1) сетевые сооружения делят на сооружения, выполняющие технологические функции на водоводах систем (каналах, лотках, трубопроводах), внутрисистемных резервуарах и водохранилищах, и специальные сооружения для обеспечения пересечения водоводов с дорогами, естественными водотоками и другими препятствиями. К сетевым сооружениям относят также сооружения на лиманах и польдерах.

Массовость мелиоративных сооружений позволяет их типизировать и широко использовать при их возведении унифицированные сборные элементы, что обеспечивает сокращение затрат и сроков строительства сооружений, повышает их надежность, облегчает автоматизацию и эксплуатацию.

По конструкции сетевые сооружения делят на *открытые*, водопроводящая часть которых имеет вид лотка с мостовым переездом или без него, и *трубчатые* (закрытые) с водопроводящей частью в виде трубы. Важная особенность последних — удобство комплексного использования одного и того же сооружения: трубчатый регулятор одновременно переезд и быстроток. Выбор конструкции зависит от назначения сооружения, условий строительства и его пропускной способности (табл. 7.2).

При распределении воды по нескольким каналам практикуют устройство узлов регуляторов. В этом случае один перегораживающий регулятор может обслуживать несколько водовыпусков, расположенных по длине канала или сосредоточенных в одном месте (рис. 7.1).

При проектировании типовых сооружений широко используют блокирование регулирующих, водомерных, дорожных и сопрягающих сооружений

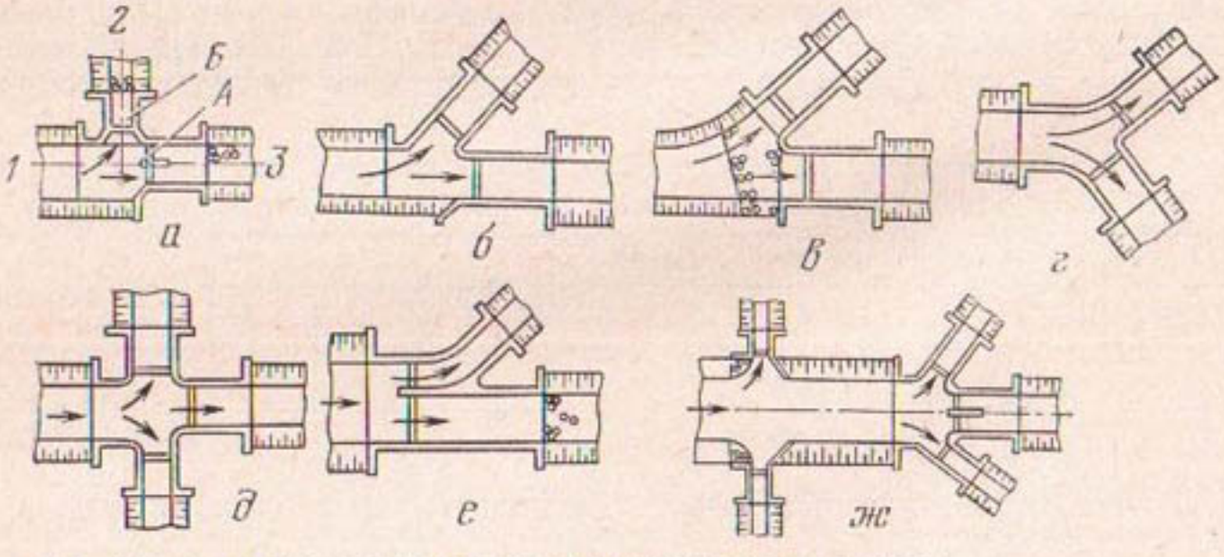


Рис. 7.1. Компоновка водовыпусков на узлах регуляторов:

а, б, в, г, д, е — сближенная; *ж* — удаленная; *А, Б* — регулятор канала и бокового отвода соответственно; *1, 3* — подводящий и отводящий каналы; *2* — канал младшего порядка

7.1. Классификация типовых сооружений на мелиоративных системах по функционально-конструктивным признакам

Тип сооружения	Тип водовода		
	открытые каналы в земляном и облицованном русле	лотковые каналы	трубопроводы
Регулирующие: для регулирования водоподачи и уровней; недопущения переполнения каналов и лотков, опорожнения трубопроводов	Регуляторы перегораживающие, водовыпускные, устьевые; аварийные сбросы; вододелители	Регуляторы перегораживающие (подпорные), водовыпускные; сбросы; вододелители	Водозаборы, водовыпуски в открытую сеть, гидранты. Регулирующие колодцы с задвижками, вантузами, регуляторами давления, расхода. Гасители статического напора, промежуточные и концевые сбросы. Колодцы: поглощающие, смотровые, регулирующие с регуляторами уровня. Устьевые сооружения
Водомеры: для планового водораспределения и водоучета	Водосливы; лотки; пороги; диафрагмы	Водомерные сооружения	Колодцы с водомерами
Сопрягающие: для сопряжения водоводов на разных уровнях	Перепады; быстротоки	Повороты; перепады; быстротоки; шахты	Сопрягающие колодцы
Дорожные: для пропуска людей и техники через водовод	Переезды трубчатые; мосты; пешеходные мостики	Переезды-дюкеры	—
Водопроводящие на канале: для пропуска воды через препятствия	Дюкеры; акведуки; трубы	Дюкеры; акведуки; трубы	—
Пересекающие канал: для пропуска естественных, талых, дождевых и селевых потоков	Трубы-ливнепропуски; дюкеры под каналом, акведуки над каналом, селедуки над каналом, трубчатые эстакады над каналом, водоприемные воронки	Ливнепропуски под лотком	—

7.2. Типы конструкций сетевых сооружений в зависимости от их пропускной способности

Пропускная способность сооружений, м³/с	Ориентировочная повторяемость, штук на 1000 га	Конструкция сооружения
До 0,5	200	Трубчатые диаметром 20...30 см
0,5...5	20	Трубчатые диаметром 40...160 см
5...20	2	Трубчатые прямоугольные или открытые
20...150	0,2	Открытые
Более 150	Индивидуальные	»

в одно комплексное с совмещением выполняемых функций, что позволяет получить более экономичные проектные решения.

Класс мелиоративных сооружений определяют в зависимости от площади, обслуживаемой ими согласно таблице 1.2.

7.2. ОСОБЕННОСТИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ СЕТЕВЫХ СООРУЖЕНИЙ

Местоположение, компоновка и тип сооружения зависят от его назначения, природных условий района строительства, наличия строительных материалов и сборных элементов, способов производства работ и условий эксплуатации. Как правило, используют типовые проекты. Задача проектирования обеспечить: заданные гидравлические условия в пределах сооружения и на примыкающих к нему участках ВБ и НБ; устойчивость и прочность сооружения и отдельных его участков; фильтрационную прочность грунтов основания; надежность и удобство эксплуатации, возможность осмотра и ремонта сооружения; выполнение требований по охране окружающей среды; высокий уровень индустриализации строительства; экономное расходование дефицитных и широкое применение местных строительных материалов.

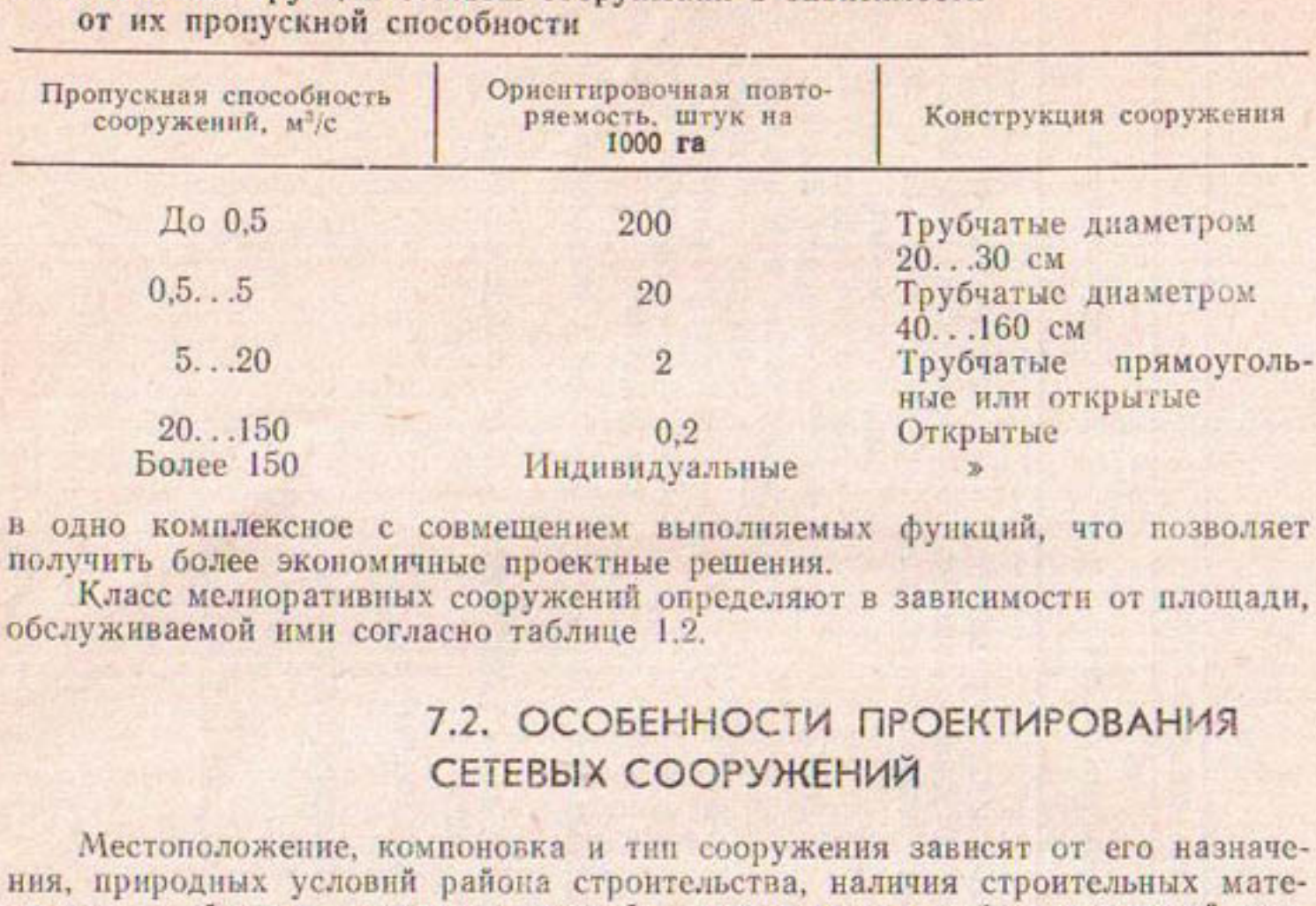


Рис. 7.2. Типовые регуляторы на расход 20...150 м³/с:

а — с клапанным затвором; *б* — с плоским затвором; *1* — подводящий канал; *2* — затвор; *3* — бык или устой; *4* — отводящий канал; *5* — шпунт

Открытые сооружения проектируют при расходах воды более 20 м³/с без устройства переезда через канал. Их применяют при наличии в потоке значительного количества мусора и при наличии опасности шуговых и наледных воздействий.

Область использования открытых сооружений: водозаборные, перегораживающие (подпорные) регуляторы, вододелители и водовыпуски в каналы младшего порядка, устьевые сооружения при впадении в каналы старшего порядка. Открытый регулятор — часть русла канала, обычно прямоугольной формы, ограниченная флютбетом и стенками и снабженная затворами (рис. 7.2). Крупные сооружения могут иметь несколько пролетов, разделенных быками. Сооружения одно-, двух- и трехпролетные — обычно доковой конструкции, без разрезки по флютбету. Превышение верха стен и откосов сооружения Δh_s над уровнем воды в канале при пропуске через сооружение расчетного расхода воды принимают по таблице 6.7 как для канала с облицовкой, а при аэрации потока и наличии сбойного течения — по данным, приведенным ниже,

Q, м³/с	До 1	1...10	10...30	30...50	50...100
Δh_s, м	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6

В быстротоках трапецеидального сечения с заложением откосов более 1,5 эти данные увеличивают на 15%.

Для сооружений в ограждающих дамбах, а также при расходах воды в канале более 100 м³/с, Δh_s определяют с учетом ветрового нагона воды и высоты наката ветровых волн в ВБ по формуле (4.1).

Превышение низа пролетного строения акведука и открытых шлюзов-регуляторов с переездами над максимальным расчетным уровнем воды в канале назначают не менее 0,5 м.

Сопряжение головных регуляторов с берегами водоисточника или земляной плотиной мало чем отличается от сопряжения низконапорных бетонных плотин на нескальном основании. Сопряжение сетевых регуляторов с откосами каналов осуществляют портальными оголовками в виде обратных стенок или оголовками с ныряющими стенками.

Особенности работы открытых сооружений на осушительной сети определяются условиями пропуска паводковых расходов воды. В зависимости от топографии и расходов расчетный паводок может проходить через сооружение или в обход него, иногда с затоплением сооружения, что обычно учитывают при его компоновке и выборе затворов.

Автоматизированное водораспределение с каскадным регулированием требует устройства в ВБ значительной призмы регулирования и размещения в НБ датчиков, управляющих работой затвора.

При значительных колебаниях уровней в водоисточнике на входе открытых регуляторов устанавливают диафрагмы (часто и такие регуляторы называют диафрагмовыми), что позволяет значительно сократить высоту затвора, упрощает его конструкцию и облегчает маневрирование.

Трубчатые сооружения используют в качестве регуляторов, переездов, а также переездов, совмещенных с регуляторами и сопрягающими сооружениями (табл. 7.3). По компоновочной схеме его целесообразно устраивать в виде горизонтальной или наклонной трубы. В последнем случае сооружение работает как трубчатый быстроток или перепад. Ширину переезда определяют по СНиП на сельскохозяйственные дороги с учетом возможности прохода сельскохозяйственной техники.

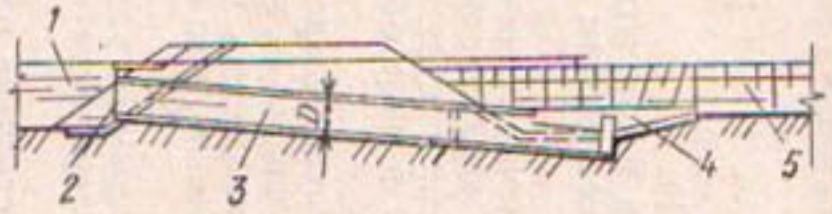
По числу труб различают одно- и многоочковые сооружения.

Трубчатые сооружения диаметром до 1,4...1,6 м целесообразно проектировать из круглых труб. С увеличением живого сечения и в многоочковых сооружениях более рационально использовать прямоугольные трубы размером 1,5×2...2×2,5 м. При еще больших размерах живого сечения потока сооружение устраивают по доковой схеме: вертикальные стенки устоев, быки, флютбет (донная плита), пролетное строение моста.

Входной оголовок, в котором размещают затворное и водомерное устройства, может быть двух типов: в перегораживающих сооружениях — портальный, в виде плоской диафрагмы, перпендикулярной оси трубы; в водовыпус-

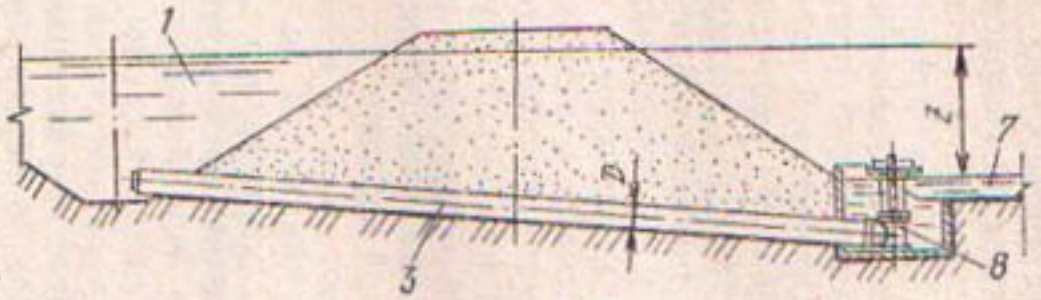
Q до 0,5 м³/с

Водовыпуск во временный ороситель (z=0,1...0,6 м, D=30...40 см)

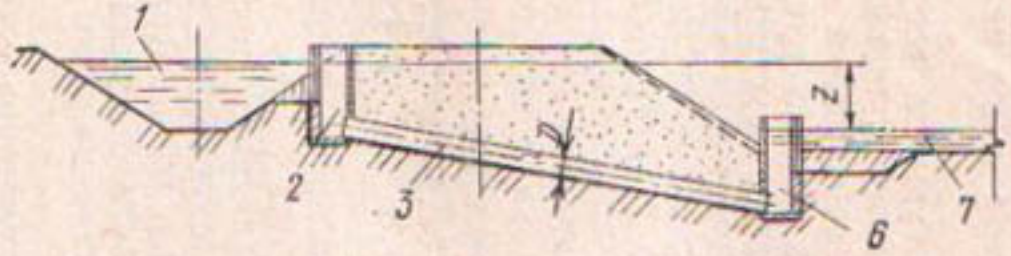


Водовыпуски в рисовые чеки:

автоматизированный (z=0,2...1,5 м, D=25...30 см)



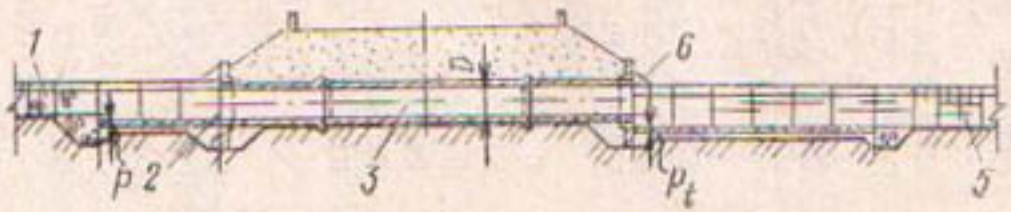
неавтоматизированный (z=0,5...1,5 м, D=20...30 см)



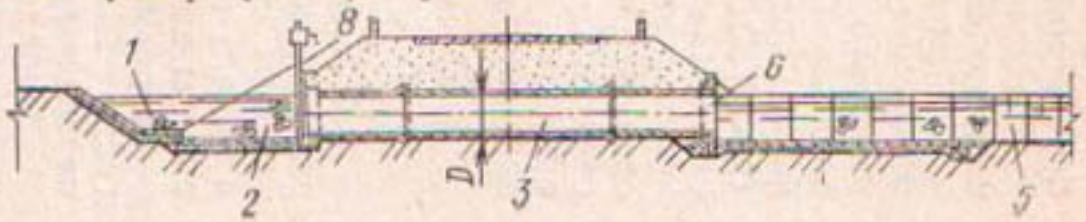
Q=0,5...5 м³/с

Неавтоматизированные (D=40, 60, 80, 100, 140 см):

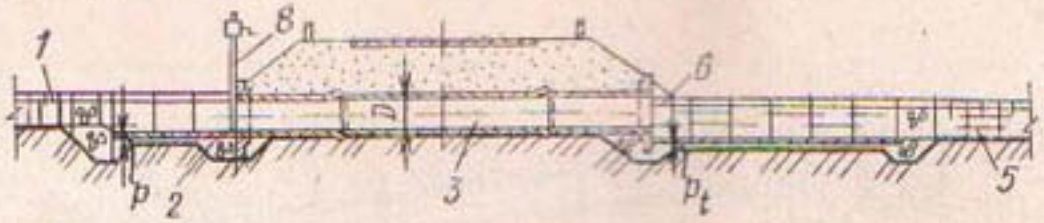
переезд



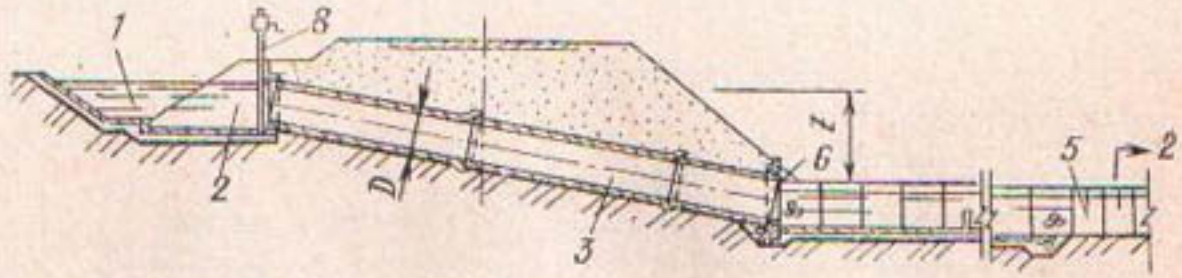
водовыпуск регулятор-переезд



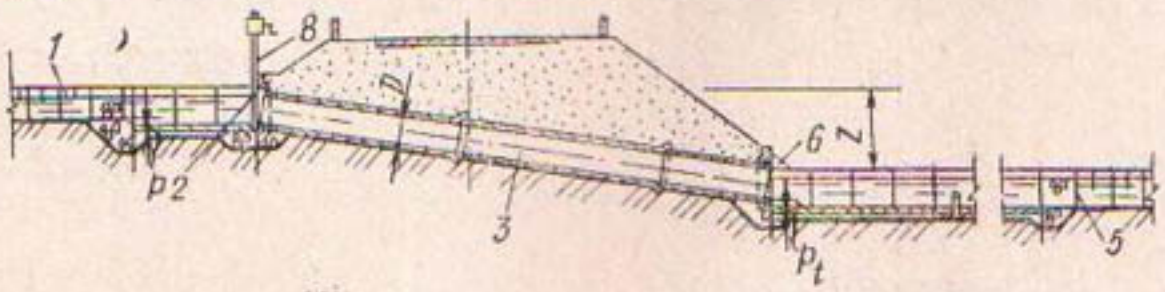
регулятор-переезд



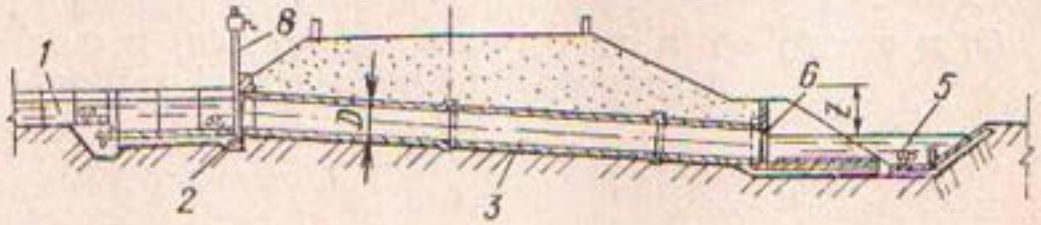
водовыпуск регулятор-переезд-быстроток (z=1...3 м)



регулятор-переезд-быстроток (z=1...3 м)

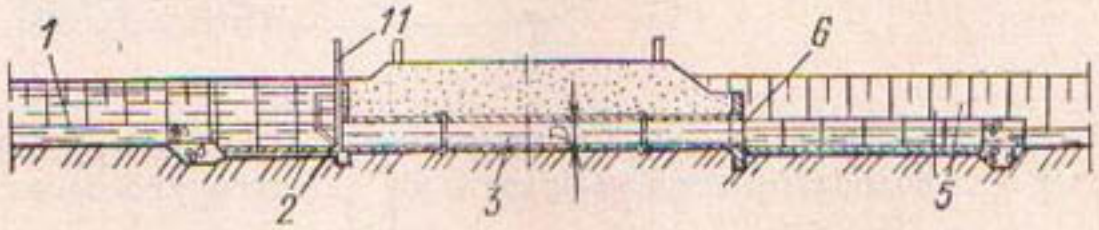


устьевой регулятор-переезд-быстроток (z=1...3 м)

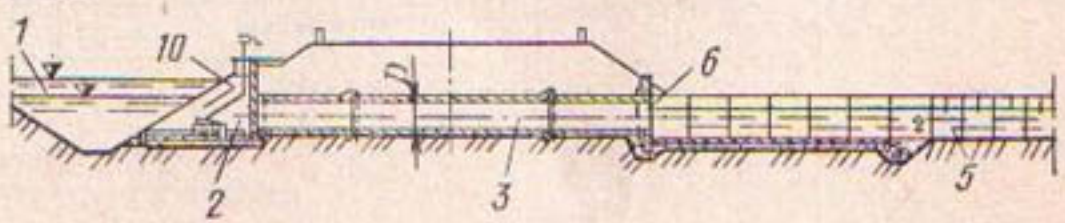


Автоматизированные по ВБ (D=40, 60, 80, 100, 140 см)

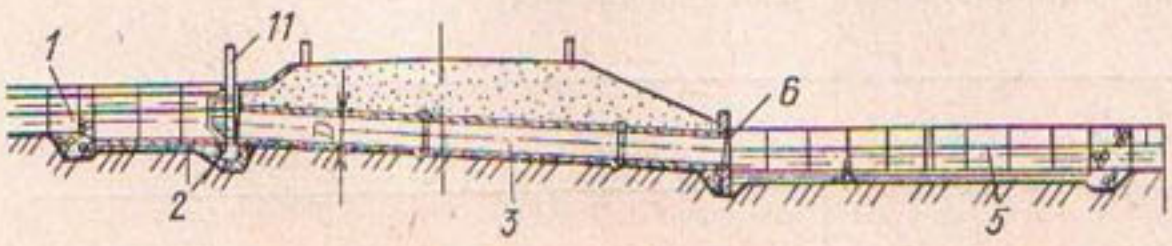
регулятор-переезд



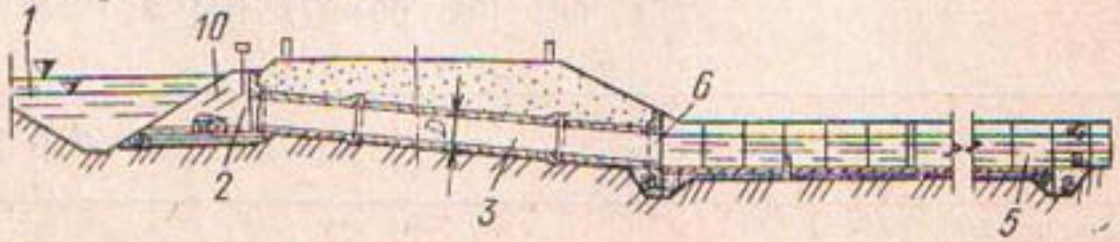
водовыпуск регулятор-переезд с автоматом (стабилизатором) расхода



регулятор-переезд-быстроток



водовыпуск регулятор-переезд-быстроток с автоматом (стабилизатором) расхода

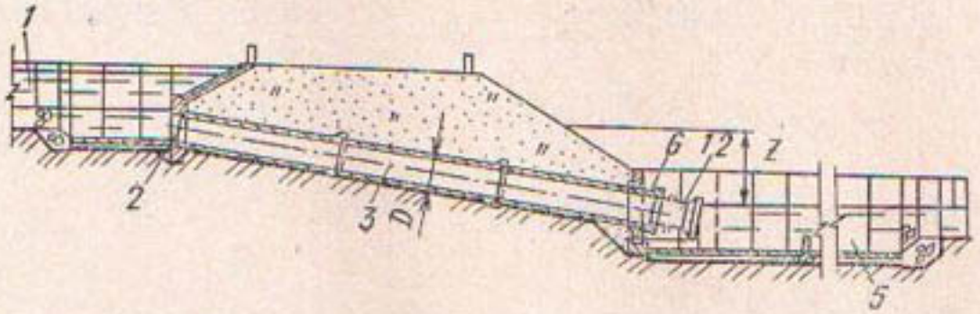


Продолжение

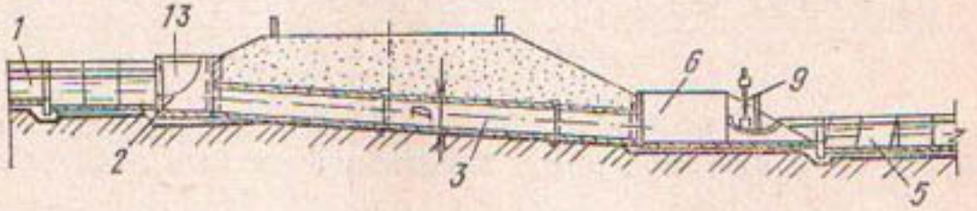
Q=0,5...5 м³/с

Для каскадного регулирования уровня воды в НБ (D=60, 80, 100, 120, 140 см):

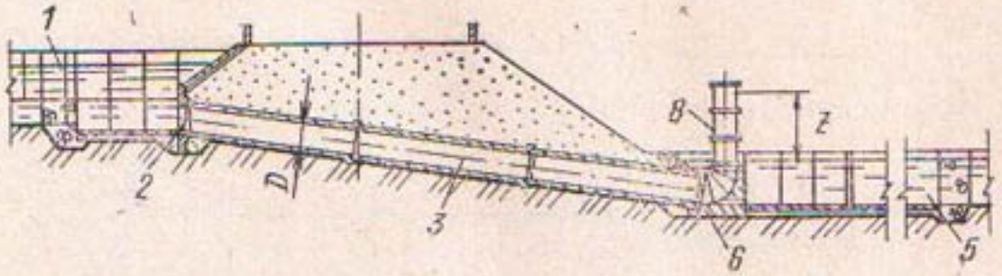
перегораживающий регулятор-переезд-быстроток z=2...5 м (при D=35 см z=0,5...0,2 м, Q=0,2...3 м³/с)



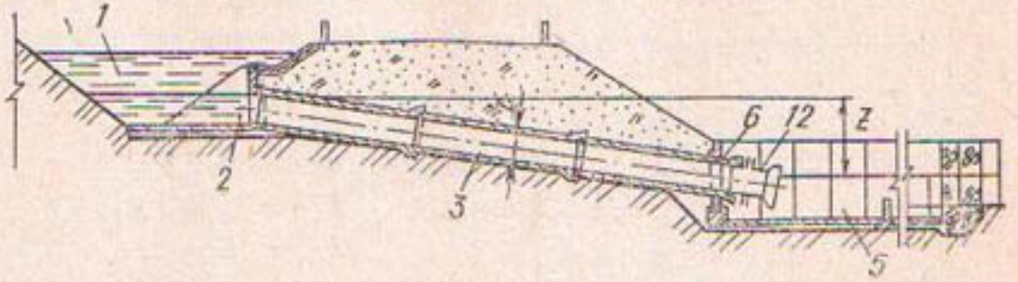
то же с водомером z=0,5...1,5 м



z=1,5...3,5 м

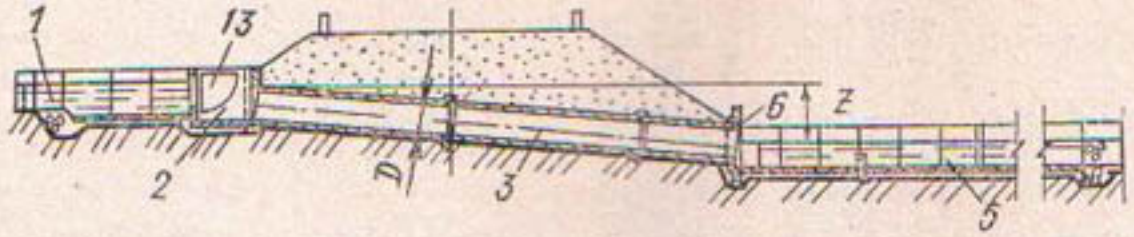


водовыпуск регулятор-переезд-быстроток z=2...5 м (при D=35 см z=0,5...2 м, Q=0,2...4 м³/с)

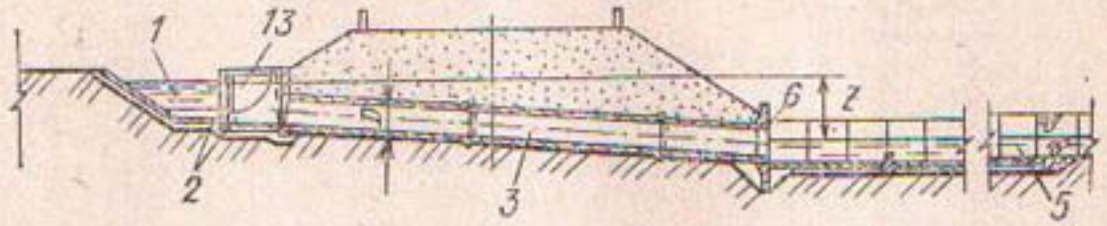


Q=5...20 м³/с

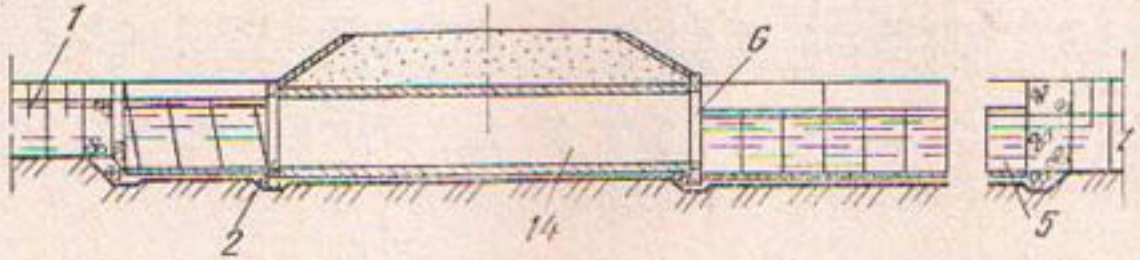
z=0,5...1,5 м



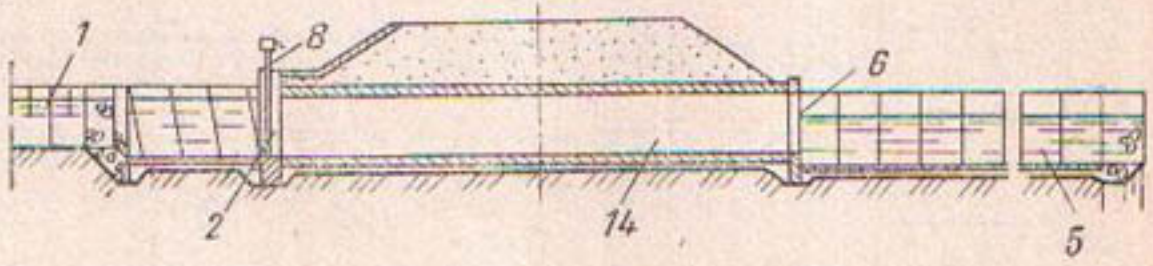
z=0,5...3,5 м (Q=0,2...3 м³/с)



Переезд
($z \leqslant 1$ м)



Регулятор-переезд
($z \leqslant 1$ м)



Примечание. D — диаметр трубы; z — перепад уровней воды в ВБ и НБ; p — заглубление трубы в ВБ; p_1 — перепад за трубой в НБ; *1* — старший распределитель; *2* — входной оголовок; *3* — труба; *4, 6* — выходная воронка или оголовок; *5* — младший канал; *7* — чек; *8, 11, 12, 13* — затвор плоский цилиндрический, ковшовый, диафрагменный, секторный; *9* — водомер; *10* — стабилизатор расхода; *14* — прямоугольная труба.

7.4. Размеры стандартных каналов, сопрягаемых с сооружениями

Диаметр трубы D, см	Ширина канала по дну b, м	Заложение откоса m	Длина откоса l, м	Глубина воды в канале h, см	Заглубление трубы p, см	Перепад за трубой p_t, см	Средняя скорость потока в канале v, м/с
		1	0,75	18...36	22...4	0...16	0,71...0,3
40	0,6	1,5	0,75	13...27	27...13	0...7	0,96...0,37
	0,8	1,5	0,75	13...27	27...13	0...7	0,77...0,3
			0,75	30...36	30...24	0	—
		1	1,25	36...53	27...7	0...13	1,48...0,35
			1,25	53...71	7...—11	13...31	
	0,6		1,50	71...81	—11...—21	31...41	
			1,00	27...41	33...19	0...1	
		1,5	1,25	41...55	19...5	1...15	1,47...0,35
60			1,50	55...69	5...0	15...29	
			0,75	25...36	35...24	0	
		1	1,00	36...53	24...7	0...13	1,52...0,37
	0,8		1,25	53...71	7...—11	13...31	
			0,75	23...27	37...33	0	
			1,00	27...41	33...19	0...1	
		1,5	1,25	41...55	19...5	1...15	1,5...0,32
			1,50	55...69	5...—9	15...29	
			1,00	49...53	31...27	0	
			1,25	53...71	27...9	0...11	
		1	1,50	71...89	9...—9	11...29	1,5...0,44
	0,6		1,75	89...107	—9...—27	29...47	
			1,25	43...55	37...25	0	
		1,5	1,50	55...69	25...11	0...9	1,49...0,52
			1,75	69...83	11...—3	9...23	
80			1,00	43...53	37...27	0	
			1,25	53...71	27...9	0...11	
		1	1,50	71...89	9...—9	11...29	1,51...0,35
			1,75	89...107	—9...—27	29...47	
	0,8		2,00	107...116	—27...—36	47...56	
			1,25	41...55	39...25	0	
		1,5	1,50	55...69	25...11	0...9	
			1,75	69...83	11...—3	9...23	1,38...0,36
			2,00	83...97	—3...—17	23...37	
		1,5	2,00	83...97	—3...—17	23...37	0,43...0,33
	1		2,00	58...69	22...11	0...9	0,64...0,38
		2	2,25	69...81	11...—7	9...21	
			1,25	66...71	34...29	0	
100	0,6	1	1,50	71...89	29...11	0...9	1,5...0,62
			1,75	89...107	11...—7	9...27	
			1,50	57...69	43...31	0	1,5...0,82
		1,5	1,75	69...83	31...17	0...3	
			1,25	60...71	40...29	0	
			1,50	71...89	29...11	0...9	1,49...0,4
		1	1,75	89...107	11...—7	9...27	
	0,8		2,00	107...124	—7...—24	27...44	

Диаметр трубы D, см	Ширина канала по дну b, м	Заложение откоса m	Длина откоса l, м	Глубина воды в канале h, см	Заглубление трубы p, см	Перепад за трубой p_1, см	Средняя скорость потока в канале v, м/с
			1,50	55...69	45...31	0	
		1,5	1,45	69...83	31...17	0...3	1,4...0,57
			2,00	83...97	17...3	3...17	
			2,00	83...97	17...3	3...17	
		1,5	2,25	97...111	3...—11	17...31	0,67...0,35
			2,50	111...125	—11...—25	31...45	
	1		2,00	58...69	42...31	0	
			2,25	69...81	31...19	0...1	
		2	2,50	81...92	19...8	1...12	0,99...0,33
			2,75	92...103	8...—3	12...23	
			3,00	103...114	—3...—14	23...34	
	0,8	1	2,00	107...124	33...16	0...4	1,45...1,16
		1,5	2,00	90...97	50...43	0	1,5...1,32
			2,00	85...97	55...43	0	
			2,25	97...111	43...29	0	
			2,50	111...125	29...15	0...5	
			2,75	125...138	15...2	5...18	
			3,00	138...152	2...—12	18...32	1,5...0,35
			3,25	152...166	—12...—26	32...46	
			3,50	166...180	—26...—40	46...60	
		1,5	3,75	180...194	—40...—54	60...74	
	1		4,00	194...204	—54...—64	74...84	
140			2,25	77...81	63...59	0	
			2,50	81...92	59...48	0	
			2,75	92...103	48...37	0	
			3,00	103...114	37...26	0	
		2	3,25	114...125	26...15	0...5	1,48...0,43
			3,50	125...136	15...4	5...16	
			3,75	136...147	4...—7	16...27	
			4,00	147...159	—7...—19	27...39	
			3,00	138...152	2...—12	18...32	
			3,25	152...166	—12...—26	32...46	0,59...0,35
		1,5	3,50	166...180	—26...—40	46...60	
			3,75	180...190	—40...—50	60...70	
	1,5		3,00	103...114	37...26	0	
			3,25	114...125	26...15	0...5	
			3,50	125...136	15...4	5...16	
		2	3,75	136...147	4...—7	16...27	0,79...0,35
			4,00	147...159	—7...—19	27...39	
			4,25	159...170	—19...—30	39...50	
			2,75	130...138	10...2	10...18	
			3,00	138...152	2...—12	18...32	
			3,25	152...166	—12...—26	32...46	
			3,50	166...180	—26...—40	46...60	1,51...0,7
2×140		1,5	3,75	180...194	—40...—54	60...74	
	1		4,00	194...204	—54...—64	74...84	
			3,25	116...125	24...15	0...5	
		2	3,50	125...136	15...4	5...16	

Продолжение

Диаметр трубы D, см	Ширина канала по дну b, м	Заложение откоса m	Длина откоса l, м	Глубина воды в канале h, см	Заглубление трубы p, см	Перепад за трубой p_t, см	Средняя скорость потока в канале v, м/с
2×140	1,5	2	3,75	136...147	4...—7	16...27	1,5...0,96
			4,00	147...150	—7...—19	27...39	
		1,5	3,00	138...152	2...—12	18...32	
			3,25	152...166	—12...—26	32...46	
			3,50	166...180	—26...—40	46...60	
			3,75	180...194	—40...—54	60...74	
			4,00	194...203	—54...—68	74...88	
			4,25	203...222	—68...—82	88...102	1,17...0,35
			4,50	222...236	—82...—96	102...116	
			4,75	236...250	—96...—100	116...130	
			5,00	250...264	—110...—124	130...144	
			5,25	264...277	—124...—137	144...157	
			5,50	227...286	—137...—148	157...166	
	1,5		3,00	107...114	33...26	0	
			3,25	114...125	26...15	0...5	
			3,50	125...136	15...4	5...16	
			3,75	136...147	4...—7	16...27	
			4,00	147...159	—7....—19	27...39	
		2	4,25	159...170	—19...—30	39...50	
			4,50	170...181	—30...—41	50...61	1,49...0,36
			4,75	181...192	—41...—52	61...72	
			5,00	192...203	—52...—63	72...83	
			5,25	203...215	—63...—75	83...95	
			5,50	215...226	—75...—86	95...106	
			5,75	226...237	—86...—97	106...117	
			8,00	237...248	—97...—108	117...128	
	2,5	1,5	4,00	194...208	—44...—68	74.. 88	
			4,25	208...222	—68...—82	88...102	
			4,50	222...236	—82...—96	102...116	0,55...0,35
			4,75	236...250	—96...—110	116...130	
			5,77	250...259	—110...—119	130...139	
		2	4,00	147...159	—7...—19	27...39	
			4,25	159...170	—19...—30	39...50	
			4,50	170...181	—30...—41	50...61	
			4,75	181...192	—41...—52	61...72	
			5,00	192...203	—52...—63	72...83	0,73...0,35
			5,25	203...215	—63...—75	83...95	
			5,50	215...226	—75...—86	95...105	
			5,75	226...232	—86...—92	105...112	

Примечание. Стандартные сечения примыкающих к сооружениям каналов даны исходя из средних скоростей при расчетном расходе 0,35...1,5 м/с. Принятая компоновка сооружений предусматривает безнапорный режим его работы при максимальном заполнении сечения трубы.

ках — оголовок с ныряющими стенками. Основные требования к сопряжению сооружения с каналом: максимальное соблюдение незаиляющих и неразмывающих скоростей и оптимальных режимов движения воды в канале в диапазоне эксплуатационных расходов; отсутствие переходных режимов течения воды (из безнапорного в напорный и обратно) в трубчатых сооружениях.

Размеры стандартных каналов, сопрягаемых с типовыми сооружениями, даны в таблице 7.4. Для достижения стабильного напорного режима трубча-

того сооружения необходимо значительное 1,5...1,7D заглубление трубы под минимальный уровень ВБ. Как видно из таблицы, такое решение при напорах на сооружение до 1,5...2 м связано с увеличением объемов земляных и бетонных работ из-за большего заглубления трубы, опасностью заиления и замерзания воды в трубе. Поэтому целесообразнее безнапорный режим работы трубчатого сооружения.

С низовой стороны трубчатое сооружение заканчивается оголовком или секцией трубы, выходящей в НБ. Последний вариант на неоплывающих грунтах основания. На перегораживающих сооружениях и водовыпусках обычно применяют портальный оголовок, на устьевых регуляторах — оголовок с ныряющими стенками.

Основной тип конструкции НБ — щелевые водобойные стенки по дну и откосам. Они исключают скопление и замерзание воды при опорожнении канала и занесение наносами НБ. Рисберма заканчивается зубом в необлицованных каналах и переходит в облицовку русла в облицованных.

Трубчатые сооружения нетребовательны к несущей способности основания, так как напряжения под ними незначительны и редко превышают 0,1—0,15 МПа. Однако в процессе монтажа труб и оголовков (особенно жестко соединяемых с трубой) возможно появление опасных изгибающих моментов за счет повисания оголовка на трубе или трубы на оголовке. Для их снижения примыкающее к оголовку звено трубы делают укороченным, предусматривают тщательное уплотнение пазух под трубой, иногда применяют укладку труб на бетонное основание.

Сетевые сооружения чувствительны к деформациям, связанным с просадками, набуханием и морозным пучением грунта. При средней глубине промерзания более 1 м в пучинистых грунтах под сооружением целесообразно устраивать подушку из непучинистого грунта толщиной $^2/_3$ средней глубины промерзания, за которую принимают среднюю из максимальных сезонных глубин промерзания под снежным покровом за период не менее 10 лет (по данным местных метеостанций). В глубоких торфах сооружения строят на песчаных подушках. На средне- и сильнопросадочных грунтах практикуют после завершения просадок и деформаций повторный монтаж сборных сооружений для постоянной эксплуатации или устройство на период замачивания временных инвентарных сооружений. Сетевые сооружения имеют малые напряжения по контакту грунт — бетон, что в сочетании с морозными и просадочными деформациями грунта может способствовать возникновению контактных неплотностей, опасных с точки зрения возможных фильтрационных деформаций (контактный размыв). В связи с этим предусматривают достаточно развитый противофильтрационный контур сооружения.

Гидравлический расчет открытых регуляторов. В большинстве случаев они работают как донные подтопленные водосливы с широким порогом, расположенные перпендикулярно оси потока, пропускную способность которых определяют по формуле

$$Q = \varepsilon\varphi b h \sqrt{2gz}, \qquad (7.1)$$

где ε — коэффициент сужения (бокового сжатия) потока, $\varepsilon = 1 - 0{,}1 n\xi H/b$ (n — число сжатий потока или удвоенное число пролетов; H — напор перед сооружением, м; ξ — коэффициент формы входа, зависящий от конструкции входа в плане):

обратная стенка с быками прямоугольного очертания	1
полуциркульное очертание быков и устоев	0,75
плавное заострение очертания быков и устоев	0,35...0,4
косая плоскость	0,4
раструб сужающийся с попуском в плане 1 : 2	0,8

φ — коэффициент скорости подхода, зависит от конструкции входа в регулятор:

косые плоскости, порог на одном уровне с дном ВБ	0,95
косые плоскости, порог приподнят	0,92
входная часть в виде конуса без порога	0,93

входная часть в виде конуса с порогом	0,90
вход с ныряющими стенками без порога	0,91
вход с ныряющими стенками и порогом	0,88

b — ширина регулятора, м; h — глубина воды над порогом, м; z — разность уровней воды в ВБ и НБ регулятора, м.

При боковом отводе потока через регулятор в формулу расхода (7.1) вводят коэффициент угла отвода δ. При угле отвода 90° и поступлении через регулятор в боковой отвод не более 20% расхода канала старшего порядка со скоростью до 1 м/с δ=0,9...0,95. При отводе более 20% расхода и скоростях 1...2,5 м/с в основном потоке коэффициент δ принимают в зависимости от угла отвода:

угол отвода, град	0	30	45	60	75	90
δ	1,0	0,97	0,95	0,93	0,90	0,86

При свободном истечении из регулятора пропускную способность вычисляют по зависимости для водослива с широким порогом без подтопления

$$Q = \varepsilon m b \sqrt{2g} H_0^{3/2}, \qquad (7.2)$$

где m — коэффициент расхода донного водослива с широким порогом при свободном истечении, m=0,36; H_0 — напор с учетом скорости подхода v, $H_0 = H + \alpha v^2/2g$; α — коэффициент Кориолиса, α=1,05.

При неполном открытии отверстия или при наличии диафрагмы гидравлический расчет открытых регуляторов проводят по формуле истечения из-под затворов

$$Q = mba\sqrt{2g}H_0, \qquad (7.3)$$

где m — коэффициент расхода воды (табл. 7.5); a — высота поднятия затвора; b — ширина отверстия.

7.5. Коэффициент расхода воды m при истечении из-под затвора

Условия и характер входа	Площадь отверстия	
	<2 м²	>2 м²
Округленные кромки, сжатие сверху	0,90	0,92
Острые кромки, сжатие сверху	0,83	0,85
Округленные кромки, сжатие сверху и с боков	0,75	0,80
Острые кромки, сжатие сверху и с боков	0,70	0,75
Округленные кромки, сжатие со всех сторон	0,65	0,70
Острые кромки, сжатие со всех сторон	0,60	0,65

Трубчатые регуляторы, работающие в безнапорном режиме, рассчитывают как водосливы с широким порогом [(см. формулу (7.1)], а при большой длине — как лотковые каналы (см. гл. 6); при работе в напорном режиме — по формуле напорных трубопроводов с преобладанием местных потерь напора (см. гл. 6).

Расчеты на прочность и сдвиг. Массовые сетевые сооружения испытывают малые напоры и усилия от давления грунта. Поэтому их устойчивость на сдвиг при обычных компоновочных схемах в большинстве случаев заведомо обеспечена, если размеры определены из условий гидравлики.

Прочностные расчеты трубчатых сооружений проводят аналогично расчетам трубопроводов для круглых труб и по принципу замкнутых рам — для прямоугольных. В продольном направлении прочность оценивают исходя из температурных деформаций, с учетом сил трения по грунту, препятствующих их развитию, и неравномерных деформаций грунта основания под трубой. Благодаря относительно небольшой длине и значительной жесткости трубы

в сооружении возникающие при этом усилия обычно не представляют опасности.

Оголовки рассчитывают на устойчивость и прочность. Оголовки портального типа (в виде поперечной диафрагмы), не соединенные жестко с трубой, представляют собой плиту, защемленную в грунтовых бортах канала и испытывающую со стороны засыпки горизонтальное давление от грунта и транспорта. Плиту оголовка рассчитывают как балочную плиту, опертую на расстоянии 0,25 проекции откоса от бровки (без учета защемления в откосе).

Устойчивость облегченного оголовка, жестко соединенного с трубой, обеспечивается примыкающим к нему звеном трубы и рассчитывают его на действие нагрузки от грунта и транспорта как две консоли, закрепленные на трубе. На более крупных каналах при больших высотах оголовка (диаметр трубы более 1 м) для портальных оголовков используют Г-образные блоки, образующие открылки, работающие как уголковые подпорные стенки. Заделку открылков оголовка в борта канала обычно не учитывают.

Оголовки с ныряющими стенками и оголовки для вододействующих затворов представляют собой жесткий пространственный блок, плиты которого рассчитывают на действие нагрузки от грунта и транспорта, а также на динамические нагрузки при транспортировании и монтаже.

Более крупные сооружения на каналах, имеющие доковую конструкцию, проектируют без продольных швов по флютбету и рассчитывают на сдвиг под действием давления воды и грунта и на прочность по элементам. Флютбет — плита на упругом основании, загруженная сверху сосредоточенными нагрузками от быков, береговых стенок устоя и моста. Армируют флютбет, исходя из указанных расчетных предпосылок. Стенку устоя армируют как консоль, заделанную во флютбет (заделка полужесткая).

Колодцы на трубопроводах рассчитывают на кольцевое сжатие грунтом засыпки и одностороннюю нагрузку от распора грунта при прохождении транспорта, а их элементы — на следующие нагрузки в эксплуатационных условиях.

Крышки потайных колодцев	Нагрузка от транспорта
Крышки выступающих над землей колодцев	Нагрузка от группы людей
Днище	Вес колодца

Кроме того, кольца и панели стеновые, кольца с днищем, крышки рассчитывают на монтажные и транспортные нагрузки.

7.3. СООРУЖЕНИЯ НА МЕЛИОРАТИВНЫХ КАНАЛАХ

Регулирующие, водомерные, сопрягающие и дорожные сооружения. Конструкция определяется пропускаемым расходом воды. *Сооружения с пропускной способностью до 0,5 м³/с* и небольшими перепадами — это чековые сооружения на рисовых системах и водовыпуски во временные оросители при поверхностном поливе. По конструкции они представляют собой трубчатый регулятор-переезд (см. табл. 7.3), состоящий из асбестоцементной трубы диаметром 200...250 и 300 мм с оголовком и затвором в ВБ или НБ.

Для неавтоматизированных сооружений обычным является устройство в ВБ оголовка с деревянными шандорами, плоскими или клапанными затворами упрощенного типа. Применяют разновидность клапанного затвора, который надевают прямо на трубу, без устройства оголовка. В эксплуатационном отношении такое решение неудачно, так как затруднено маневрирование затвором. Для автоматизированных водовыпускных сооружений характерно устройство оголовка и затворов в НБ, что более удобно для поддержания уровня воды в нем. При этом используют цилиндрические и диафрагменные затворы прямого действия.

Для опорожнения чека устраивают отдельный водоспуск с плоским или тарельчатым затвором или совмещенный водовыпуск-водоспуск с цилиндриче-

ской водосливной насадкой над водоспускной трубой. При сопряжении трубы водоспуска с перпендикулярно расположенным сбросным каналом возможны размывы. Чтобы избежать их, используют специальные гасители или расширяющиеся в концевой части трубы-насадки.

Сооружения на каналах с расходом воды 0,5...5 м³/с: трубчатые переезды, регуляторы-переезды, регуляторы-переезды-быстротоки (см. табл. 7.3). Допускаемый перепад — до 3 м. Водопроводящая часть — железобетонная труба диаметром 40...160 см. Входной оголовок — плоская диафрагма или объемный блок с ныряющими стенками.

Низовое сопряжение трубчатого сооружения с каналом устраивают в виде выходящей в НБ трубы без оголовка, объемного оголовка с ныряющими стенками или плоской диафрагмы.

Неавтоматизированные сооружения обычно не имеют затворов или имеют плоские затворы во входных оголовках. Используют их в качестве переездов, перегораживающих сооружений, водовыпусков из старшего канала в младший (на орошении), устьевых регуляторов при впадении младшего коллектора в старший (на осушении). Назначение — обеспечивать ручным регулированием плановое водораспределение и водоотведение, переезд через канал.

Автоматизированные сооружения отличаются от предыдущих специальным затворным оборудованием, автоматически поддерживающим уровень воды в ВБ или НБ либо стабилизацию забираемого расхода. Перегораживающие сооружения с коробчатым (ковшовым) затвором (см. табл. 7.3) автоматически поддерживают уровень ВБ, их применяют на осушительных коллекторах. Дождевые паводки они пропускают автоматически, а расход весеннего половодья — при поднятых затворах.

Водовыпуски с автоматом (стабилизатором) расхода обеспечивают забор заданного расхода воды из старшего канала независимо от колебания уровней в нем. Применяют их на оросительных системах с плановым водораспределением. При замене стабилизатора расхода на водомер эти водовыпуски могут служить водомерным сооружением.

Для каскадного регулирования по НБ, обеспечивающего водопотребление «по требованию», предназначены сооружения с вододействующими затворами (см. табл. 7.3). При перепадах 0,5...1,5 м обычно применяют секторные затворы; 1,5...3,5 м — цилиндрические; 2...5 м — диафрагменные. В НБ сооружения с секторным затвором может быть поставлен оголовок с водомером. Компоновочные схемы сооружений определяются требованиями автоматических затворов.

На каналах с расходом воды 5...20 м³/с по типовым проектам сооружают трубчатые переезды и регуляторы-переезды с перепадом до 1 м (см. табл. 7.3). Сооружения с бо́льшим перепадом редки, и проектируют их как индивидуальные. При этом используют следующие решения: при перепаде уровней до 2...3 м — наклонная прямоугольная труба с перепадом или быстротоком за ней; при бо́льших перепадах — открытый быстроток с искусственной шероховатостью с мостом или без него, с затвором или без затвора. Типовые сооружения из прямоугольных труб собирают из сборных секций, жестко соединяемых с помощью железобетонных омоноличенных стыков. Оголовки устраивают из центрального элемента, жестко соединяемого с трубой, с плоским затвором со стороны ВБ, и боковых открылков в виде сборных уголковых подпорных стенок.

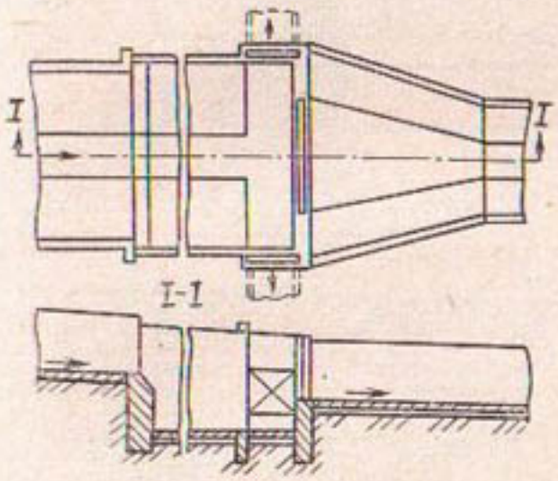
Для систем с автоматизацией водораспределения затвор проектируют с электроприводом и устройствами, управляющими его положением в зависимости от уровней ВБ или НБ. Управление затвором может быть дистанционным.

Сооружения на каналах с расходом воды 20...150 м³/с встречаются редко, и типизации поддаются лишь наиболее часто повторяющиеся из них шлюзы-регуляторы. Тип конструкции — открытый. Оснащены клапанными и плоскими сдвоенными, реже сегментными затворами (см. рис. 7.2). Сооружения имеют доковую конструкцию. Устой П-образный с открылками в виде уголковых подпорных стенок. Шлюзы-регуляторы с клапанными затворами рассчитаны на напоры до 3 м, применяют их при высоких паводках. Сооружения с плоскими сдвоенными затворами обычно имеют напор до 5 м. В связи

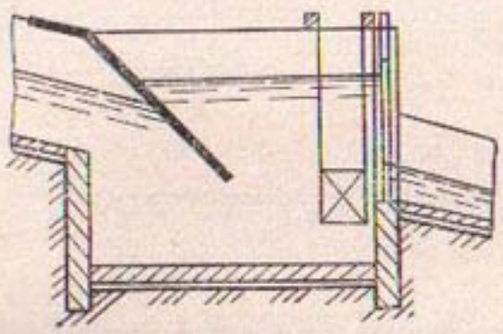
7.6. Конструкции вертикальных вододелителей

С делением потока в вертикальной плоскости	Донных (без гашения энергии)

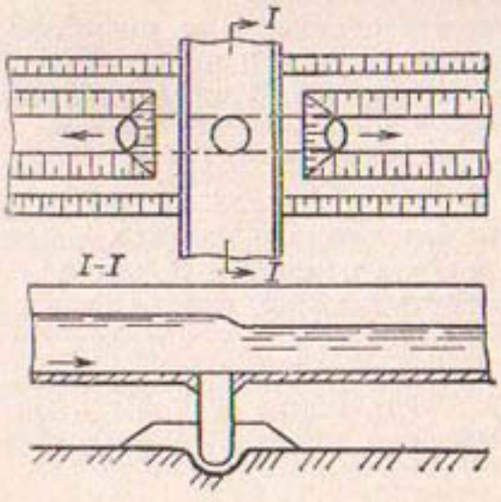
Вододелители с гашением энергии:
с гасительным колодцем



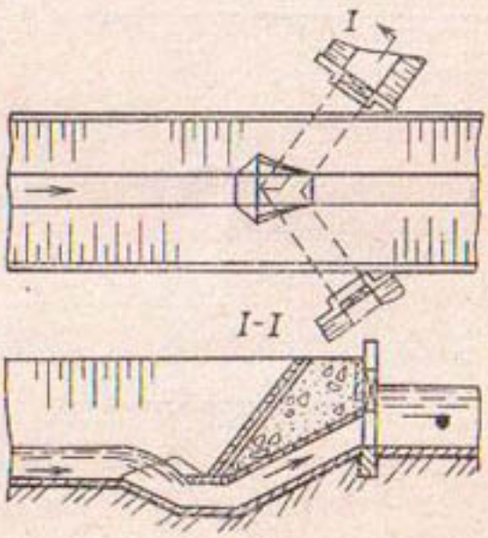
с гасительным колодцем и диафрагмой



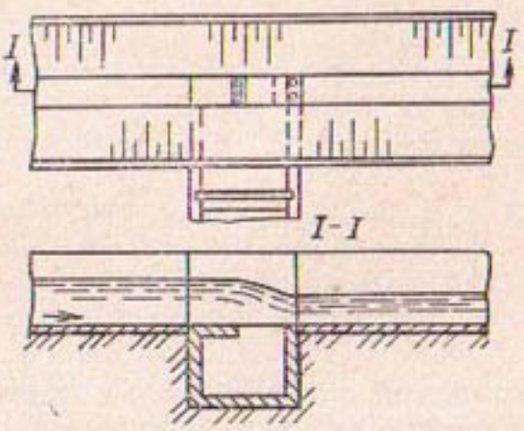
Вододелители без гашения энергии:
трубчатый



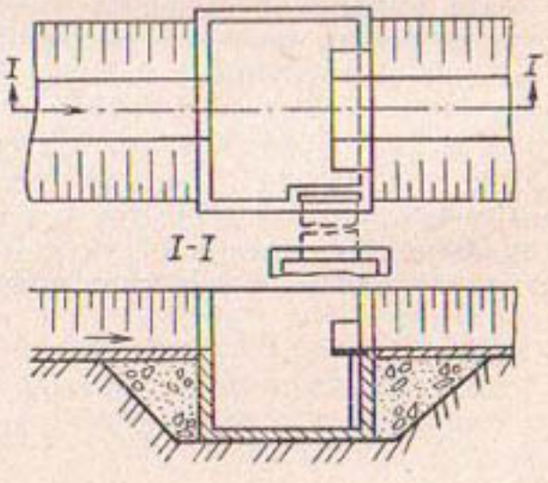
Водораспределитель-автомат:



конструкции АрмНИИВПиГ

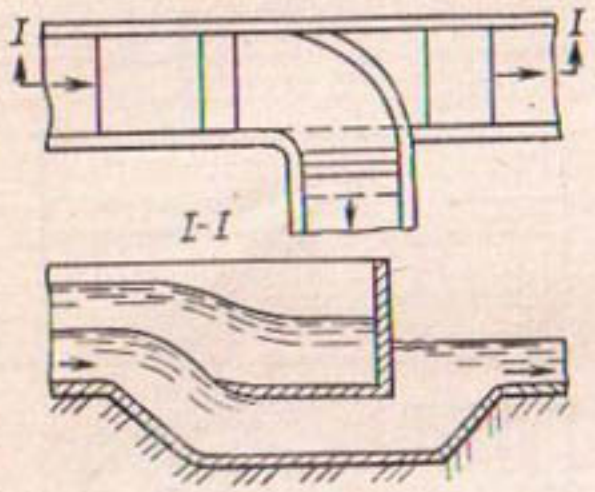


конструкции Киргизгипроводхоза

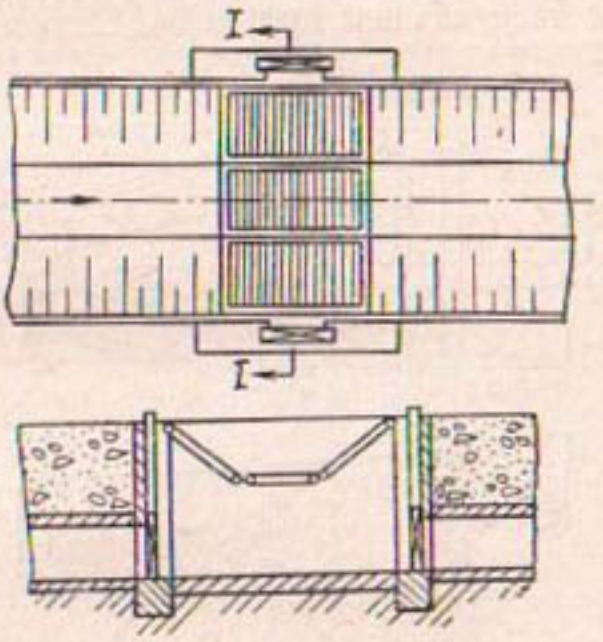


С делением потока в вертикальной плоскости	Донных (без гашения энергии)

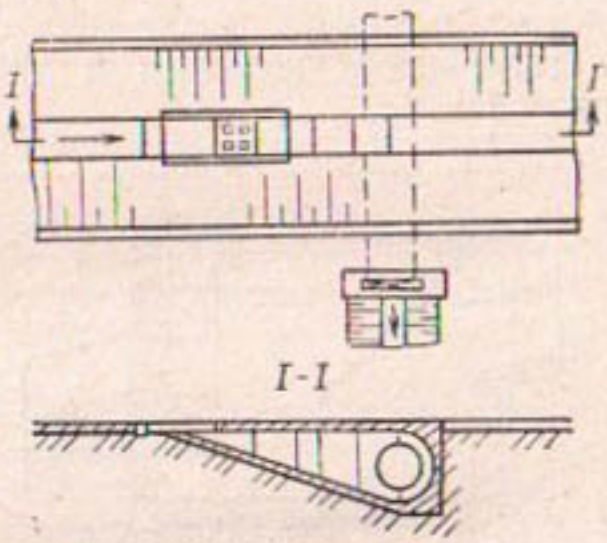
лотковый



решетчатый



вихревой



с относительно небольшими сдвигающими усилиями пригрузка флютбета водой не требуется и затворы сдвигаются к ВБ, а водобой размещают в пределах быков, под мостом. Противофильтрационный контур сооружения обычно имеет шпунт или глубокий зуб в начале флютбета.

Сопрягающие сооружения на расход воды выше 20 м³/с проектируют индивидуально. Наиболее часто применяют быстротоки с искусственной шероховатостью. Возможно оснащение их затворами и мостами.

На каналах с большим уклоном сооружают специальные *вододелители.* Бурный режим потока в мелиоративных каналах горных и предгорных районов страны затрудняет распределение воды по системе. Малые глубины наполнения требуют максимального использования кинетической энергии потока, а всякое стеснение живого сечения при вододелении ведет к появлению прыжков и резких подъемов уровней воды. В этих условиях основным принципом сооружения является отвод воды в канал младшего порядка при минимальном нарушении структуры потока в канале старшего порядка. Этому принципу отвечают два типа вододелителей: вертикальные, основанные на делении потока в вертикальной плоскости, и плановые с делением потока в плане.

Вертикальные вододелители (табл. 7.6) по принципу работы делят на: вододелители с гашением кинетической энергии, в которых бурный поток

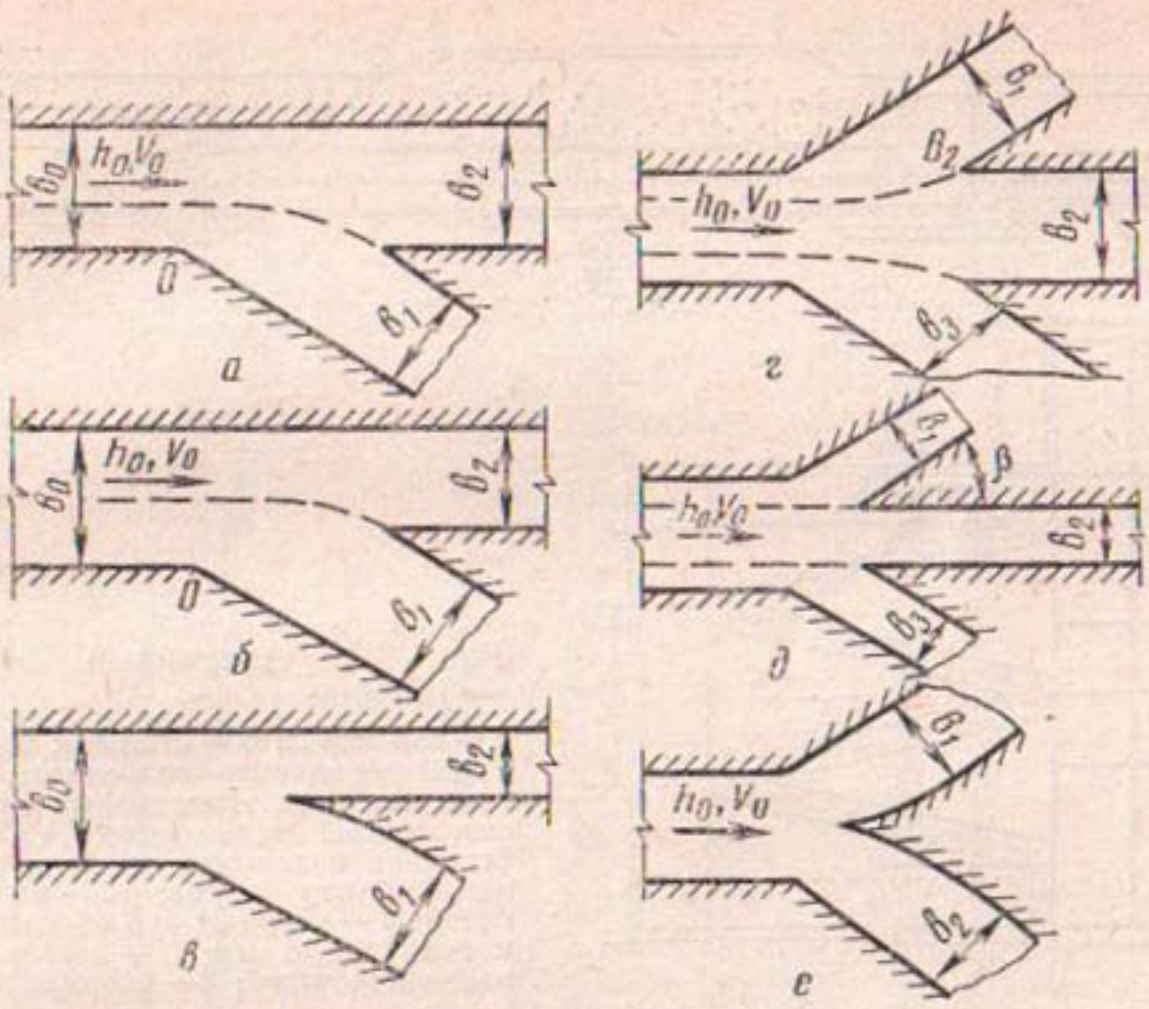


Рис. 7.3. Схемы плановых вододелителей:

а, б, в — для одностороннего отвода; *г, д, е* — для двухстороннего отвода воды; b_0, h_0, v_0 — ширина, глубина и скорость потока в основном канале; b_1, b_2, b_3 — ширина боковых отводов

преобразуется в спокойный с помощью водобойного колодца перегораживающего сооружения, а затем осуществляется выпуск в отвод через регулятор и пропуск транзитного расхода через открытые отверстия перегораживающего сооружения;

вододелители без гашения энергии, в которых часть расхода в канал младшего порядка отводят введением в поток сифона или трубки. К этому же типу относятся донные водовыпуски, когда в дне магистрального канала делают щель, переходящую в трубу, с помощью которой и отводят часть расхода из канала.

Плановые вододелители имеют конструкции, определяемые условием сопряжения отводимого и транзитного потока (рис. 7.3). Углы и параметры отводов определяют специальными гидравлическими расчетами.

Аварийные сбросы предназначены для защиты канала от переполнения. Типовой аварийный трубчатый водосброс с оголовком в виде полигонального водослива (рис. 7.4) надежен, удобен в эксплуатации и обеспечивает сброс значительных расходов при небольшом превышении уровня воды над нормальным благодаря большой длине водосбросного фронта. В сооружении максимально использованы серийно изготавливаемые детали из сборного железобетона: плиты, Г-образные блоки, трубы. Иногда в качестве аварийного водосброса используют и сифон, однако он менее надежен из-за возможности забивания плавающим мусором. Запруды (рис. 7.5) устраивают для защиты канала от размыва, когда режим его работы допускает образование кривых спада. Особенно эффективны они на легко размываемых грунтах. Кроме того, это дешевое сооружение из стандартных деталей выполняет функции небольшого (до 1 м) перепада на канале, что расширяет диапазон уклонов местности для грунтовых каналов без крепления.

Водопроводящие сооружения на канале при пересечении его трассы с естественными препятствиями. Эти сооружения относительно редки, их конструкции тесно увязаны с конкретными условиями прохождения трассы и характером препятствия, поэтому они трудно поддаются типизации. Исполь-

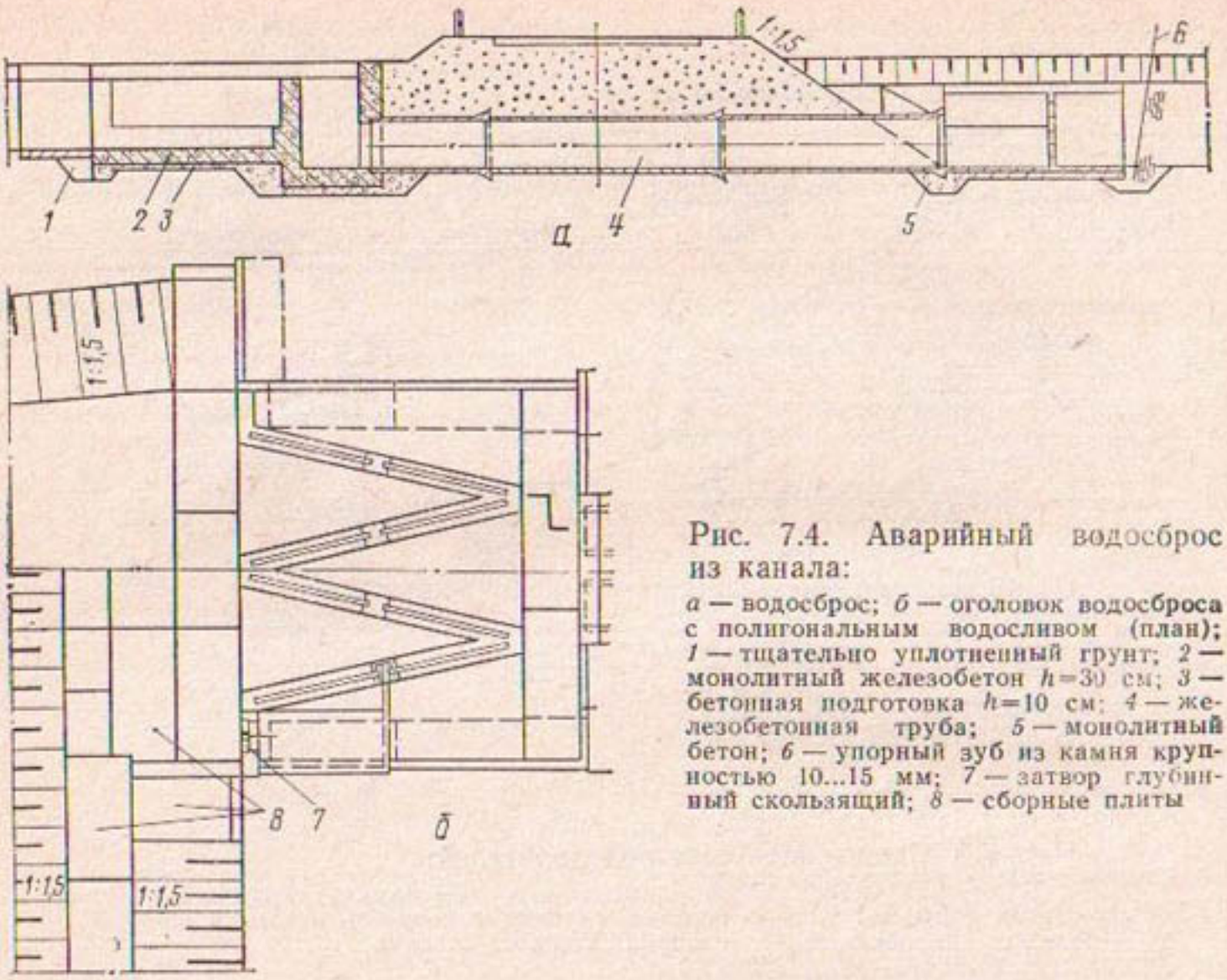


Рис. 7.4. Аварийный водосброс из канала:

а — водосброс; *б* — оголовок водосброса с полигональным водосливом (план); *1* — тщательно уплотненный грунт; *2* — монолитный железобетон $h=30$ см; *3* — бетонная подготовка $h=10$ см; *4* — железобетонная труба; *5* — монолитный бетон; *6* — упорный зуб из камня крупностью 10...15 мм; *7* — затвор глубинный скользящий; *8* — сборные плиты

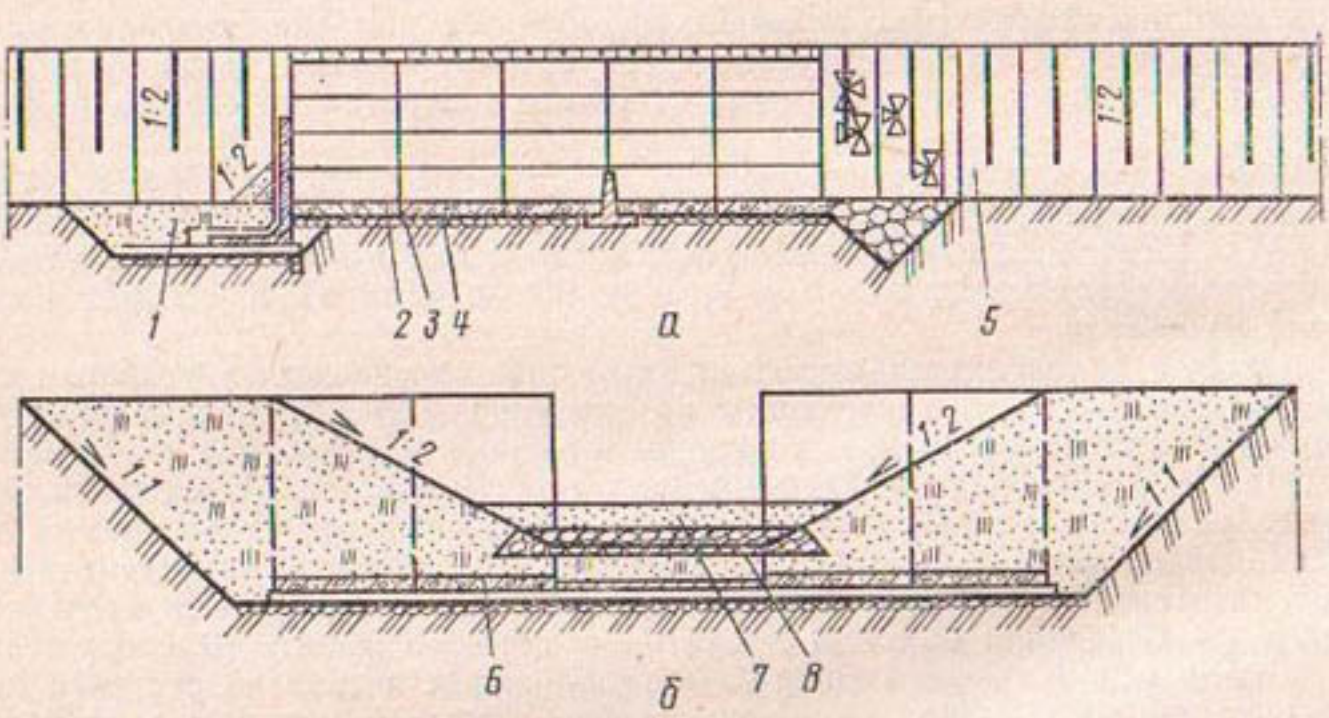


Рис. 7.5. Запруда на канале:

а — продольный разрез по оси; *б* — поперечное сечение по ВБ; *1* — понур из суглинка; *2* — монолитный железобетон; *3* — толь; *4* — щебень; *5* — посев многолетних трав по слою растительного грунта; *6* — Г-образный блок; *7* — засыпка песчаным грунтом; *8* — дренажная призма из щебня

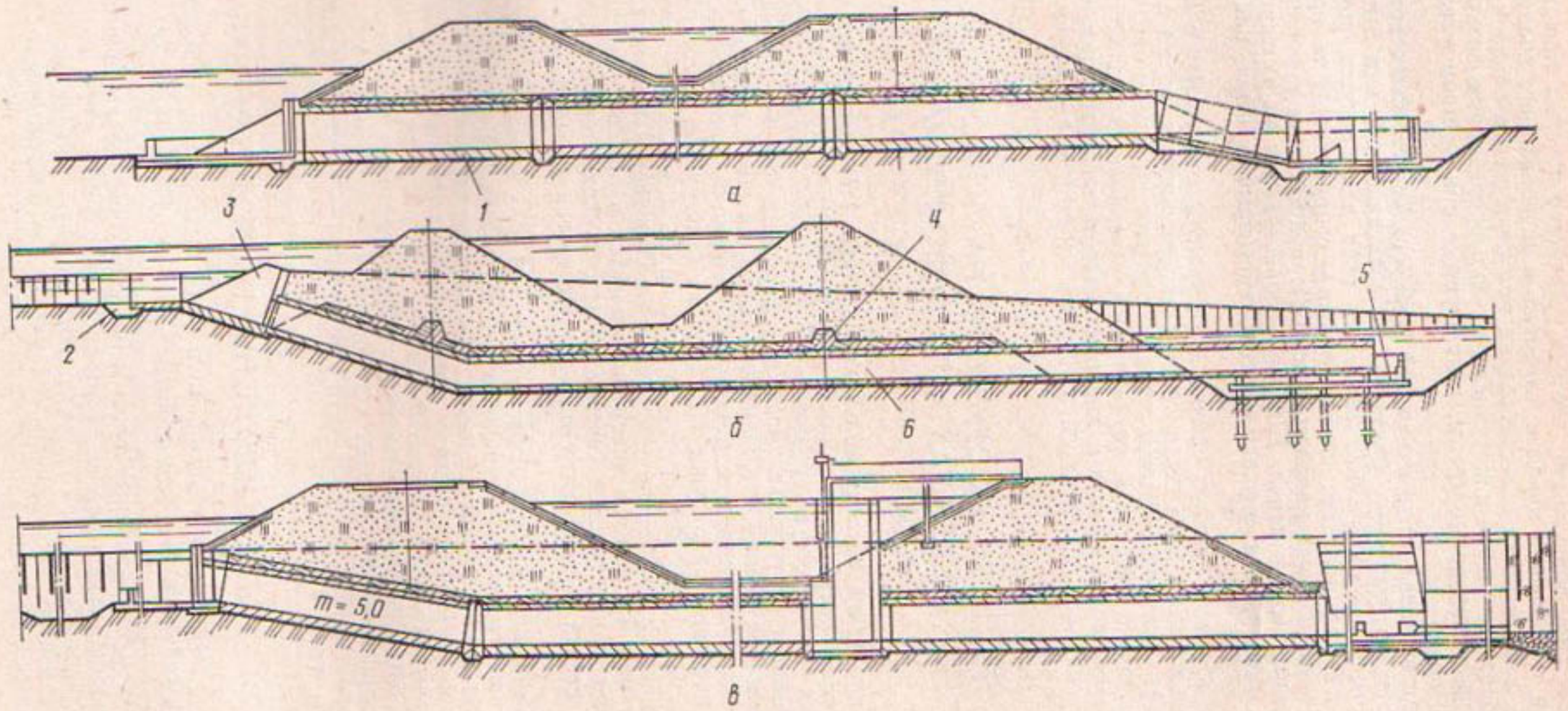


Рис. 7.6. Типовые конструкции ливнепропусков:

а — из прямоугольных труб; *б* — из круглых труб; *в* — совмещенных с аварийным сбросом; *1*, *6* — трубы железобетонные прямоугольные и круглые; *2* — зуб; *3* — оголовок; *4* — глиняный экран; *5* — гаситель

зуют следующие типы сооружений: дюкеры, устройство которых экономически оправдано при пересечении каналом глубоких и широких рек, долин, оврагов; акведуки, экономически целесообразные при пересечении каналом глубоких каньонообразных понижений; туннели, обычно прорезающие возвышенности; безнапорные и напорные трубы, используемые при местном увеличении уклона трассы канала.

Пересекающие канал сооружения для пропуска естественных водотоков и потоков. По конструкции они близки к вышеописанным. К ним относятся: акведуки и селедуки — сооружения лоткового типа для пропуска водных и селевых потоков над каналом; ливнепропуски — сооружения для пропуска дождевых и талых вод под каналом (рис. 7.6); водосборные воронки — для стока естественных вод в канал. Широко распространены на осушительной сети. Типовая конструкция воронки — лоток, врезанный в откос или торец канала.

Для более крупных каналов обычно ливнепропуск совмещают с аварийным сбросом из канала в виде соединенной с ливнепропуском шахты с затвором (рис. 7.6, *в*). С помощью затворов при необходимости можно опорожнить канал через шахту, в аварийных случаях вода переливается в шахту через стенки. При пересечениях канала с дорогами сооружают автодорожные мосты, а для обеспечения пешеходного движения через канал — железобетонные пешеходные мостики.

7.4. СООРУЖЕНИЯ НА ЛОТКОВЫХ КАНАЛАХ И ЛОТКОВО-ТРУБЧАТОЙ СЕТИ

Типовые сооружения на лотковых каналах (табл. 7.7) выполняют в виде секции лотка, снабженной необходимым затворным оборудованием. Основание сооружения соответствует условиям прохождения канала: грунтовая подушка в выемке и полувыемке, железобетонная подушка на поверхности, сваи или стойки над землей. Используют также колодцы прямоугольного сечения, хорошо сопрягающиеся с лотками. Конструкции вододелителей для лотковой сети показаны на рисунке 7.7. Типовая конструкция рассчитана на лотки глубиной 0,6...1,2 м при скоростях течения 1...4 м/с. Сооружение состоит из железобетонного колодца (короба), расположенного на опорах, вода в который поступает из лотка и затем направляется в отводы. Колодец вододелителя имеет прямоугольное сечение. Лотки канала старшего порядка врезаны в его стенки и опираются на них. Отверстия отводов оснащены затворами.

В горно-предгорных условиях при бурных режимах потока в водоводах применяют лотково-трубчатую безнапорную сеть, в которой расположенные вдоль склона лотки чередуются с уложенными поперек склона трубопроводами. Основной конструктивный элемент сооружений — глубокие стаканообразные прямоугольные колодцы, закрытые сверху. На участках с возможным выплескиванием воды сверху закрывают и лотки. При малых расходах обычно используют дроссельные затворы, установленные в отрезках труб. Одно из наиболее характерных для этой сети сооружений — переход из лотка в трубопровод (см. табл. 7.7).

7.5. СООРУЖЕНИЯ НА ТРУБОПРОВОДАХ

С бурным развитием трубчатых мелиоративных систем развиваются, видоизменяются, снабжаются новым оборудованием сооружения на трубопроводах.

На напорных и самонапорных оросительных трубопроводах применяют: водозаборы, колодцы регулирующие, делители статического напора, гидранты, водовыпуски, сбросы (см. табл. 7.7). Оборудование разнообразно по назначению и конструктивному исполнению: автоматические регуляторы давления и расхода, задвижки, вантузы, автоматические водовыпуски и пр.

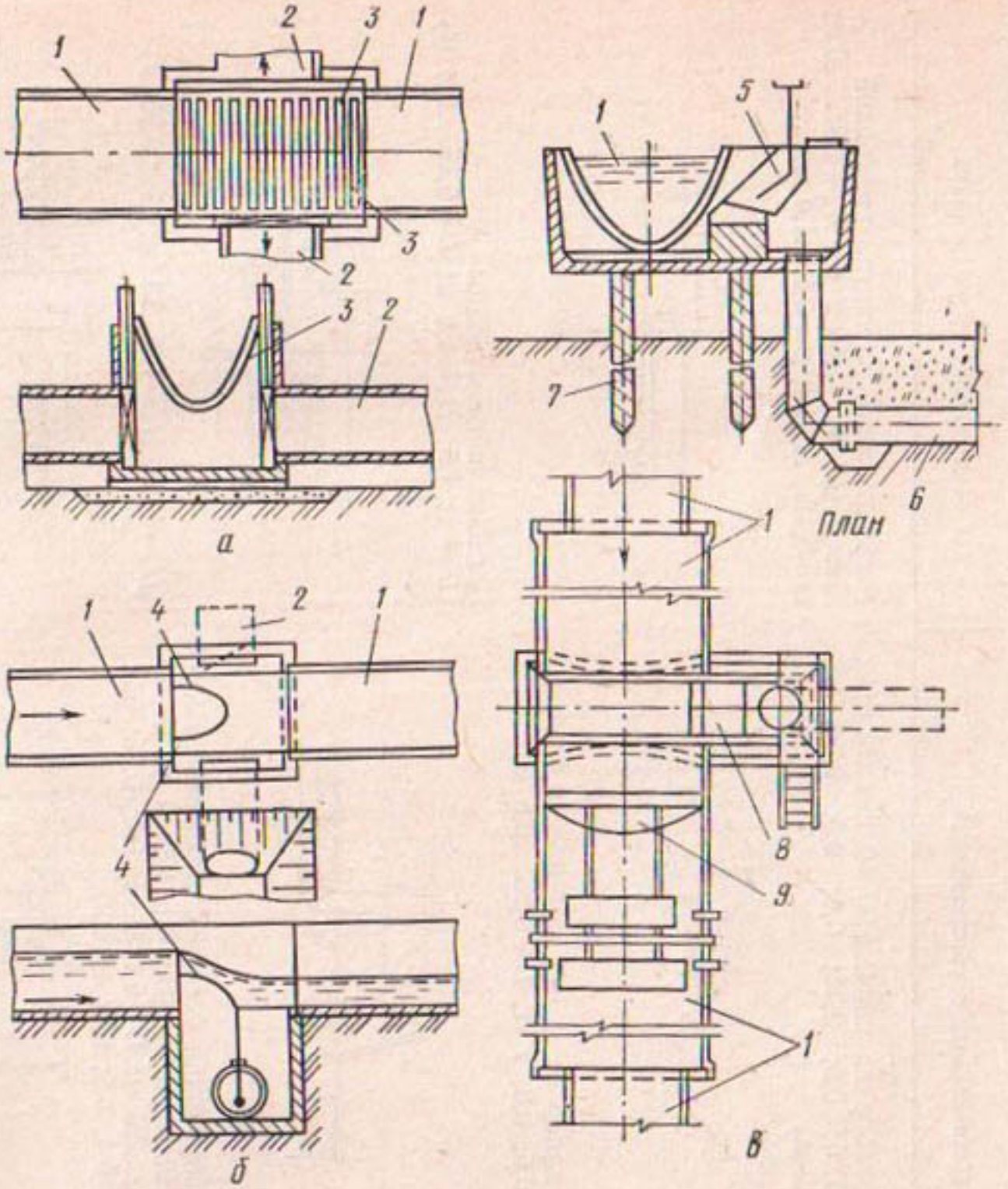


Рис. 7.7. Вододелители для лотковой сети:

а, б — решетчатый и с отсекателем для бурных потоков; *в* — для спокойных потоков; *1* — лоток; *2* — боковой отвод; *3* — решетка; *4* — отсекатель; *5* — автомат (стабилизатор) расхода; *6* — асбестоцементный трубопровод; *7* — сваи; *8* — порог автомата расхода; *9* — вододействующий затвор

На безнапорных дренажных трубопроводах применяют: регулирующие, смотровые и сопрягающие колодцы, колодцы, поглощающие поверхностный сток и грунтовые воды, устьевые сооружения (см. табл. 7.7). При регулировании расхода воды используют различные автоматические затворы.

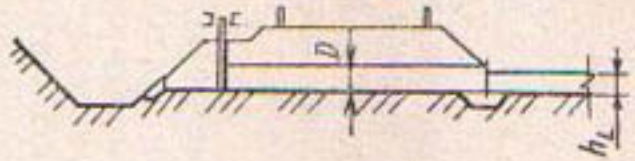
Основной конструктивный тип сооружений на мелиоративных трубопроводах — колодцы, в которых размещают оборудование (рис. 7.8). На трубопроводах диаметром до 600 мм сооружают круглые колодцы из стеновых колец, а на более крупных — квадратные из стеновых панелей с монолитным дном.

В пучинистых грунтах предусматривают специальные мероприятия, предотвращающие опасные деформации верхней части колодцев, например обсыпку непучинистым грунтом. Колодцы обычно проектируют выступающими над поверхностью земли, чтобы исключить наезд техники. Если частая ревизия и обслуживание колодца не требуются, то используют потайной подземный колодец с крышкой ниже пахотного слоя.

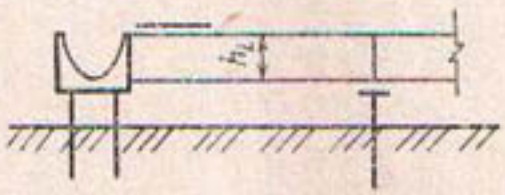
7.7. Схемы типовых мелиоративных сооружений на лотковых каналах и трубопроводах

На лотковых каналах	На напорных трубопроводах	На безнапорных трубопроводах

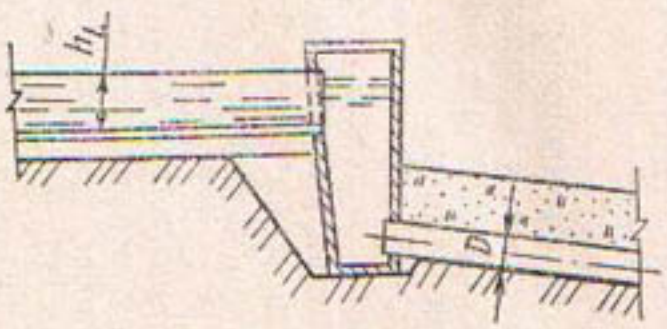
Водозабор из канала (Q=0,2...2,1 м³/с; z=0,17...0,53 м; h_L=0,4; 0,6; 0,8; 1 м)



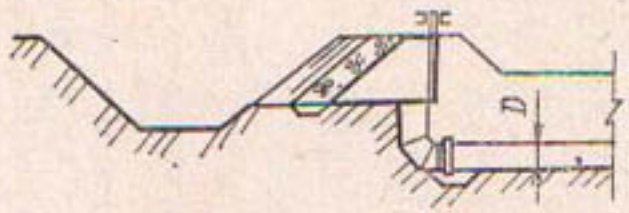
Поворот лотка (Q=0,13...1,9 м³/с; h_L=0,4; 0,6; 0,8; 1 м)



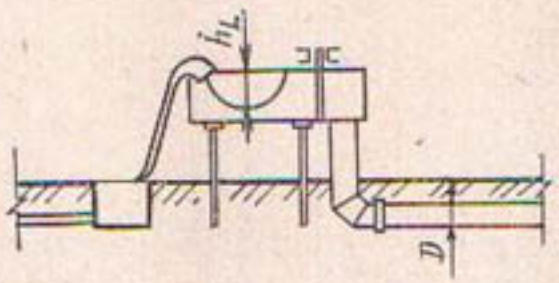
Переход лотка в трубопровод (h_L=0,6...1,2 м)



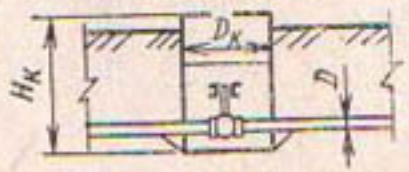
Водозабор из канала (Q=0,05...0,4 м³/с; D=0,25; 0,3; 0,35; 0,4; 0,5; 0,6; 0,8; 1; 1,2 м)



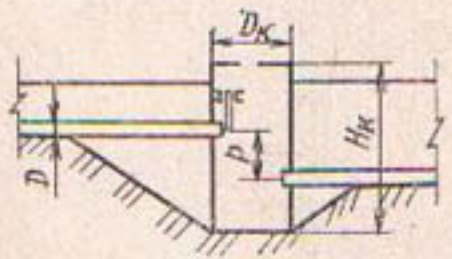
Водозабор из лотка (Q=0,2...0,4 м³/с; h_L=0,6; 0,8; 1 м; D=0,25...0,6 м)



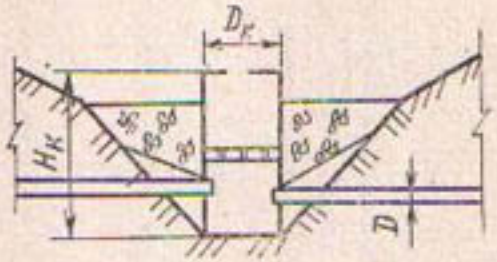
Регулирующий колодец, делитель статического напора (D_k=1; 1,5; 2 м; H_k=1,5...3,5 м; D=0,1; 0,15; 0,2; 0,25; 0,3; 0,35; 0,4; 0,5; 0,8; 1; 1,2)



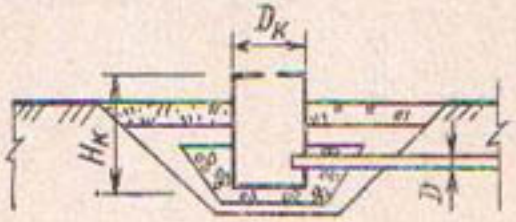
Регулирующий колодец, смотровой колодец (D_k=1; 1,5; 2 м; H_k=1,8...3,6 м; D=0,15...1,2 м; p=0,1...1,4 м)



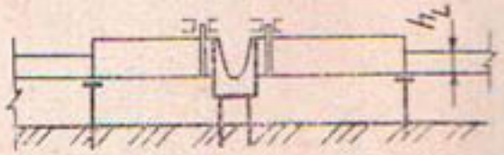
Поглощающие колодцы (D_k=1; 1,5; H_k=1,9 м; D=0,15...0,4 м)



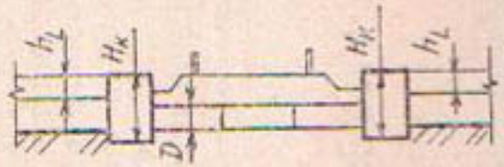
(D_k=1 м; H_k=1,8; 2,1 м; $D \leqslant$0,25 м)



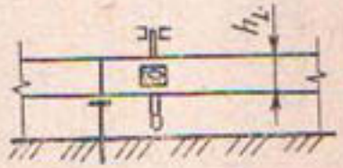
Вододелитель-регулятор (Q=0,25...1,12 м³/с; h_L=0,4; 0,6; 0,8; 1 м)



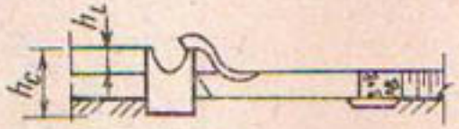
Дюкер-переезд (Q=0,17...2,1 м³/с; z=0,13...0,59 м; h_L=0,4; 0,6; 0,8; 1 м; D=0,8; 1 м)



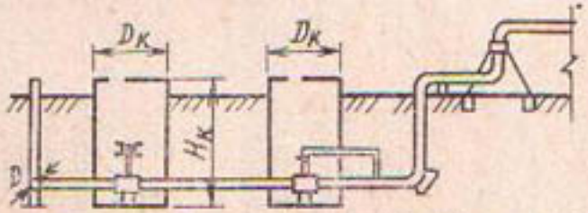
Водовыпуск (Q=0,1...0,15 м³/с; h_L=0,4; 0,6; 0,8; 1 м)



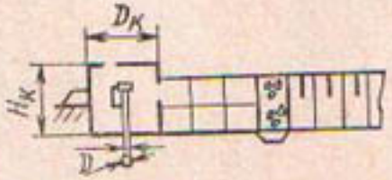
Аварийный сброс (Q=0,1...0,3 м³/с; z=1...2 м; h=0,6; 0,8; 1 м; h_c=2,5 м)



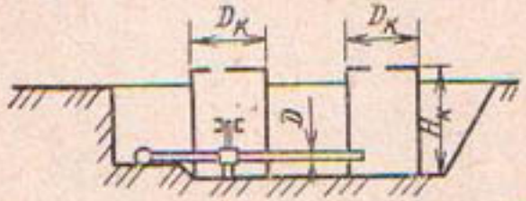
Гидрант (Q=0,1 м³/с; D_k=1,5 м; H_k=1,5...3,6 м; D=0,25...0,5 м)



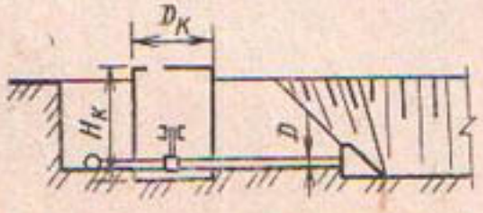
Водовыпуск (Q=0,07...0,12 м³/с; d=0,1; 0,15 м; D=0,2...0,5 м; D_k=1 м; H_k=1,5 м)



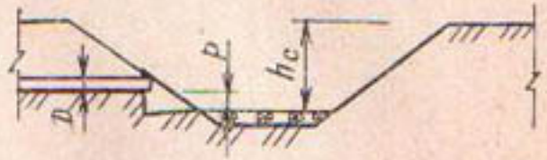
Сброс в колодец (D_k= 1 м; H_k=1,5...3,6 м; D=0,1; 0,15 м)



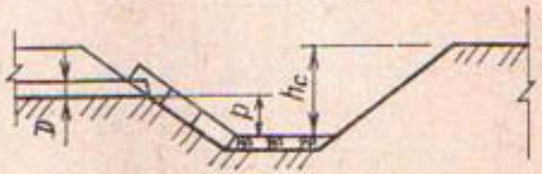
Сброс в естественное понижение (D_k=1 м; H_k=1,5...3,6 м; D=0,1; 0,15 м)



Устья:
h_c≤2,5 м; p≤0,5 м; D≤0,25 м



h_c≤2,5 м; p=0,5...1,5 м; D≤0,25 м



Примечание. Q — расход воды, проходящий через сооружение; z — допустимый перепад бьефов; h_L — глубина лотка; D — диаметр трубы; h_c — глубина воды в канале; D_k, H_k — диаметр и глубина колодца; p — перепад уровней воды.

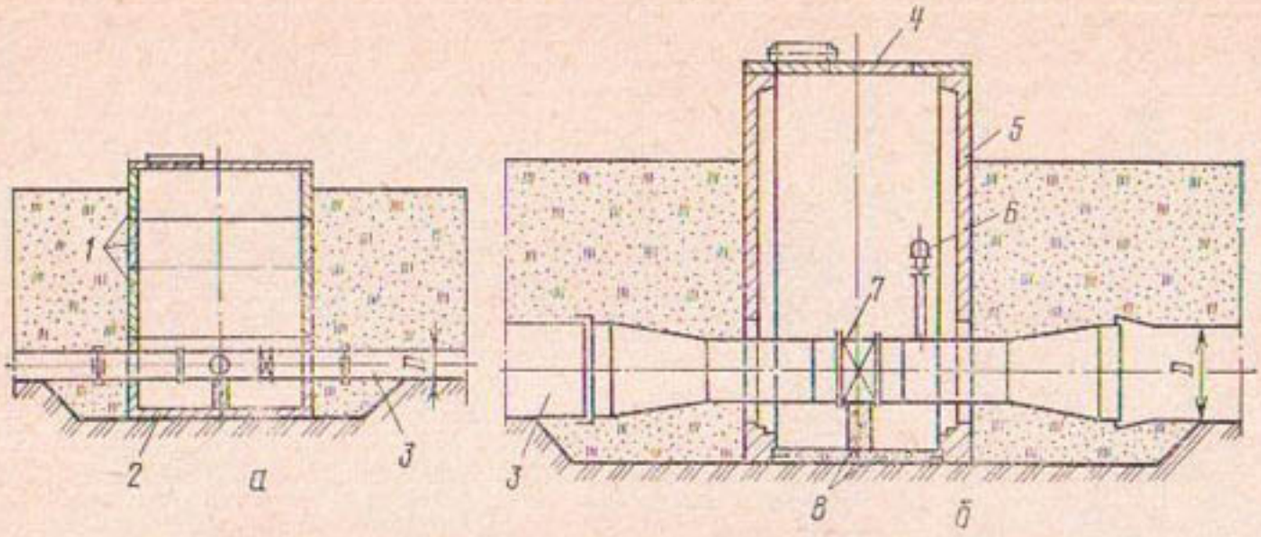


Рис. 7.8. Колодцы на напорных трубопроводах:

а — круглый; *б* — квадратный; *1* — кольцо стеновое; *2* — кольцо с днищем; *3* — трубопровод; *4* — плита перекрытия; *5* — стеновая панель; *6* — вантуз мембранный; *7* — дисковый затвор; *8* — монолитный бетон

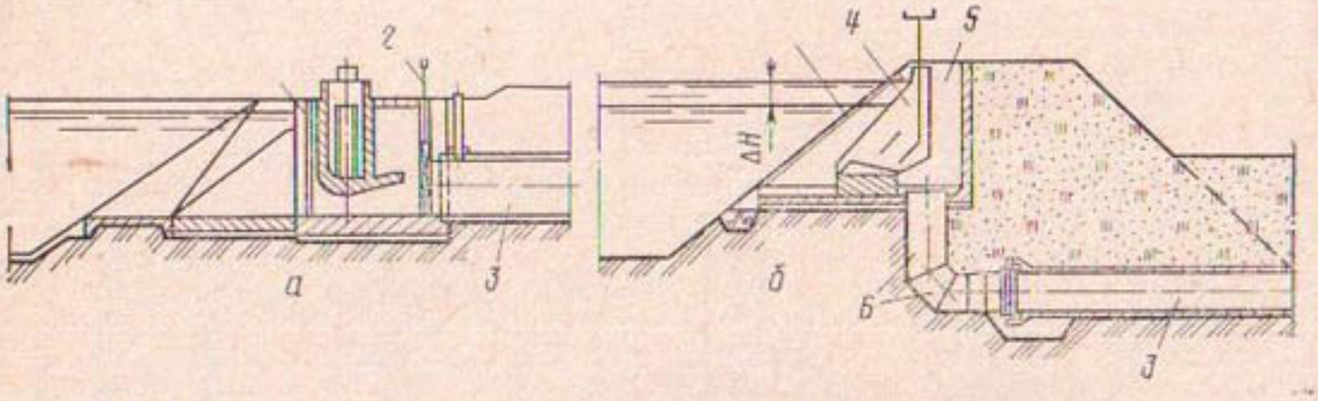


Рис. 7.9. Водозаборы из канала в самонапорный трубопровод:

а — для труб диаметром 800 мм; *б* — для труб диаметром 600 мм; *1* — решетка; *2* — затвор; *3* — труба; *4* — автомат (стабилизатор) расхода; *5* — блок оголовка; *6* — колено трубопровода

Водозабор в напорный трубопровод осуществляют насосной станцией, а в самонапорные — с помощью специальных регуляторов (рис. 7.9). Самонапорные трубопроводы оснащают делителями статического напора (рис. 7.10), которые ограничивают действующий напор в трубах при сокращении и прекращении расхода воды, чтобы избежать укладки высоконапорных труб.

Водовыпуски из трубопроводов обычно снабжены автоматическими затворами.

7.6. СООРУЖЕНИЯ НА ЛИМАНАХ И ПОЛЬДЕРАХ

Сооружения на лиманах и польдерах — специфические мелиоративные сооружения, отличающиеся режимом работы и конструктивным исполнением.

Сооружения на лиманах — это трубчатые регуляторы, с помощью которых заполняют лиманы. От регуляторов на каналах отличаются тем, что работают на пустой бьеф, аналогично трубам под автомобильными дорогами, но в отличие от них снабжены затворами. Самое простое решение — труба, заглубленная под уровень НБ. Но при этом велика опасность засорения. Более рациональная конструкция — труба на поверхности с устройством в НБ поперечных порогов, обеспечивающих интенсивное растекание потока до безопасных удельных расходов.

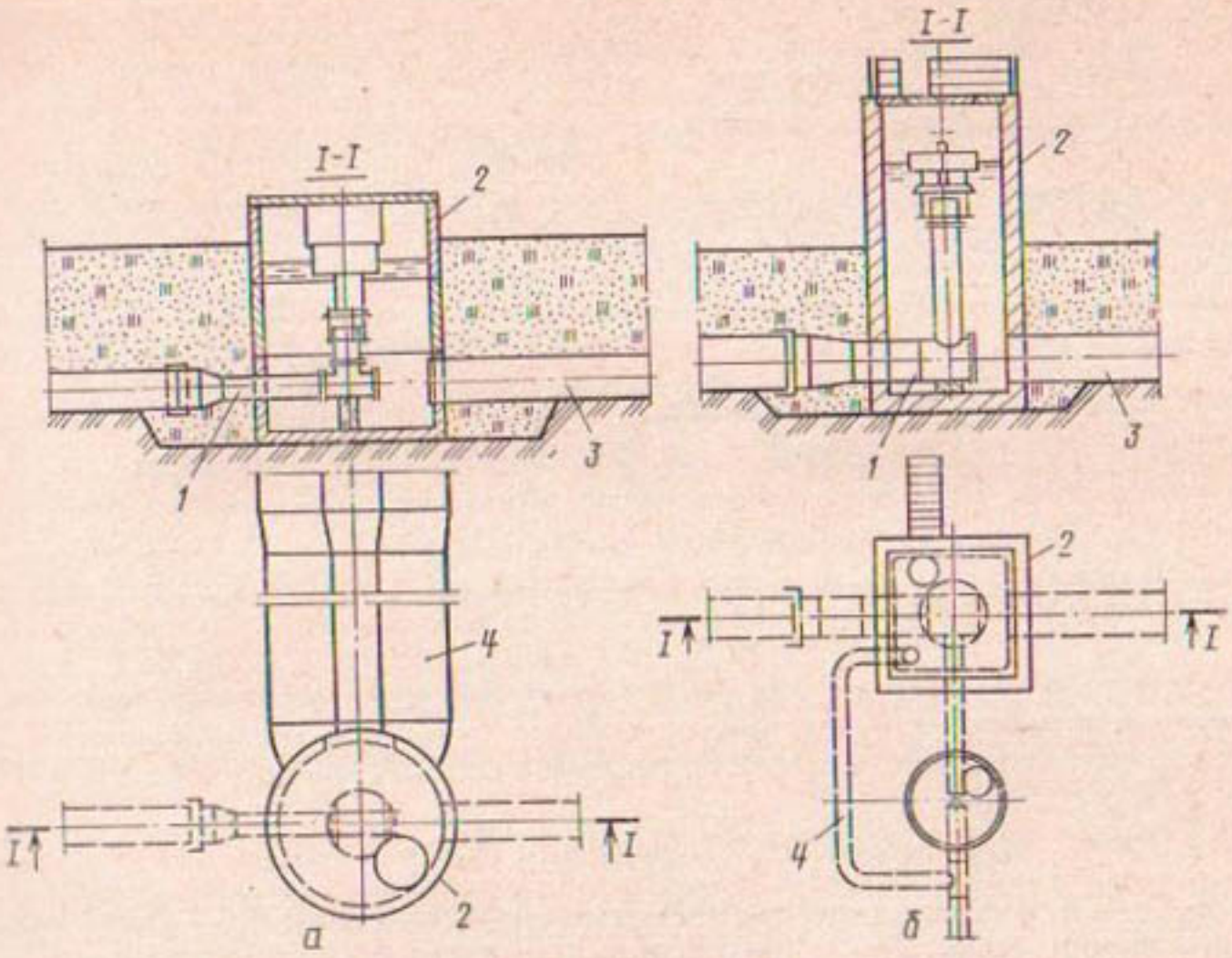


Рис. 7.10. Делители статического напора на самонапорных трубопроводах:
а — в круглом колодце; *б* — в квадратном колодце; *1, 3* — трубопровод подводящий и отводящий; *2* — колодец с затвором; *4* — аварийный сброс

Сооружения на польдерах предназначены для заполнения затапливаемых польдеров и представляют собой открытые регуляторы. От регуляторов на канале отличаются тем, что в первый период работают на незаполненный НБ. В связи с этим в сооружениях на польдерных системах используют развитые конструкции НБ, обеспечивающие интенсивное растекание потока. Шлюзы-регуляторы на польдерах рассчитывают на расход воды, позволяющий затопить польдер до перелива через дамбу. Допускаемый перепад между бьефами в момент перелива обычно принимают не более 25 см. Гребень дамбы рассчитывают на недопущение размывов при этом перепаде и укрепляют каменной наброской и устройством бетонной подушки. Более подробно польдеры освещены в справочнике «Осушение».

7.7. ПРОТИВОЭРОЗИОННЫЕ СООРУЖЕНИЯ

Эрозия — это процесс разрушения и переноса почвы и подстилающих ее пород водой и ветром. Выделяют водную и ветровую эрозию, а по интенсивности протекания — нормальную (естественную) и ускоренную.

Для защиты почв от размыва применяют противоэрозионные мероприятия: организационно-хозяйственные, агротехнические, лесомелиоративные и гидротехнические.

Гидротехнические мероприятия. Они предназначены для предотвращения или уменьшения концентрации поверхностного стока, предупреждения образования оврагов, балок, размоин и разрушения горных склонов. Противоэрозионные гидротехнические сооружения по назначению разделяют на водозадерживающие (валы, террасы, лиманы, собирательные и нагорные каналы) и водонаправляющие (поперечные запруды, пороги, перепады, быстротоки, водосбросы).

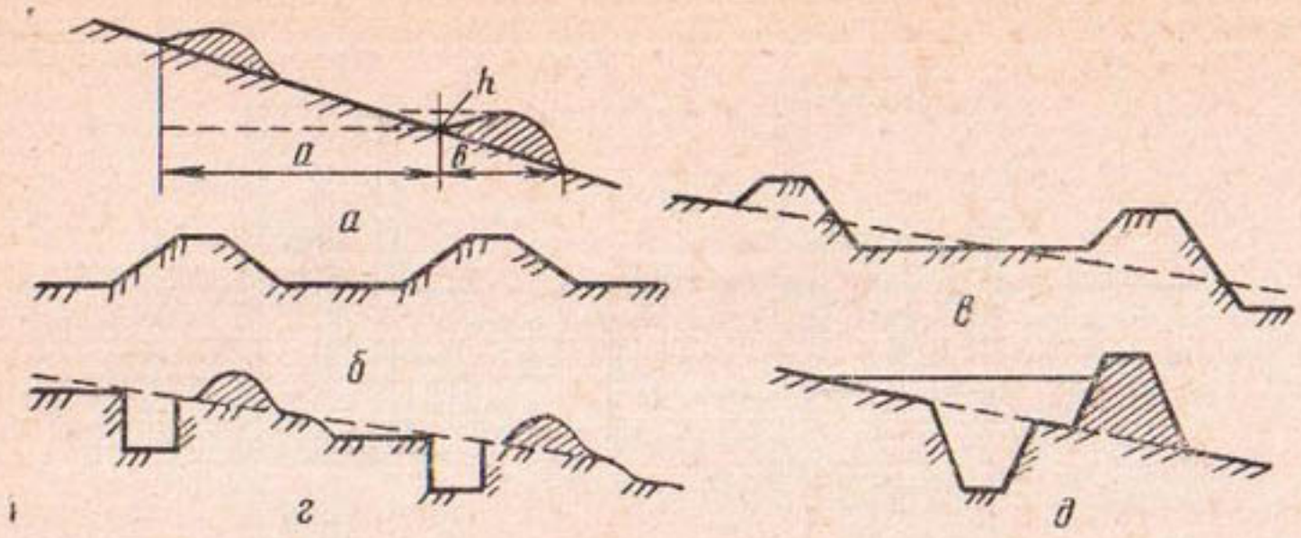


Рис. 7.11. Схема противоэрозионных валов и террас:
а — водозадерживающие валы; *б, в, г* — соответственно гребневая, ступенчатая и траншейная террасы; *д* — терраса-канава

Защитные валы (рис. 7.11) — это уплотненная земляная насыпь для задержания ливневых и талых вод на склонах оврагов и возвышенностях. Расстояние между валами назначают из условия исключения эрозии на выбранном участке склона длиной

$$L = 0{,}000034 v^{3{,}32}_{adm} / m^{2{,}32}_{w} [\, i^{1{,}16} n\, (\rho - k_w)], \qquad (7.4)$$

где v_{adm} — допускаемая неразмыкающая скорость стока; m_w — коэффициент концентрации стока; i — уклон склона; ρ — интенсивность осадков; k_w — водопоглощение; n — коэффициент шероховатости склона.

Допускаемую эрозию на данном участке q_{amd} определяют по формуле

$$q_{adm} = 0{,}011 \gamma A d_m \{308\, (\rho - k_w)^{0{,}6}\, i^{0{,}7} m_w^{1{,}4} n^{0{,}6} a^{1{,}6} / v^2_{adm} + \\ + 0{,}000013 v^{3{,}32}_{adm} / [(\rho - k_w)\, i^{1{,}16} m_w^{2{,}32} n]\}\, t/a, \qquad (7.5)$$

где γ, d_m — удельный вес и средний диаметр частиц грунта; A — площадь участка; t — время выпадения дождя; a — расстояние между валами.

Задаваясь q_{adm} и L, из уравнений (7.4) и (7.5) определяют расстояние между валами.

Высоту вала рассчитывают на полное задержание склонового стока вызываемого осадками повторяемости раз в 10 лет, по формуле

$$h = 0{,}25 [-bi + \sqrt{b^2 i^2 + 32 i a t\, (\rho - k_{wm})}], \qquad (7.6)$$

где h, b — высота и ширина вала; k_{wm} — средняя скорость поглощения воды почвой за время выпадения дождя t.

Строительную высоту свеженасыпных валов с поправкой на усадку и уплотнение принимают на 26. . .30% больше расчетной. Если определенная по формуле (7.6) высота окажется больше, чем допускаемая по условиям производства работ, то расстояние между валами уменьшают.

При устройстве перед валами канав высоту валов вычисляют по формуле

$$h = 0{,}25 [-bi + \sqrt{b^2 i^2 + 32 i a t\, (\rho - k_{wm}) - 4 A_c}], \qquad (7.7)$$

где A_c — площадь поперечного сечения канала.

Искусственные террасы — это горизонтальные или малоуклонные площадки, образующие уступ на склоне местности. Расстояния между террасами и ширину их рассчитывают аналогично валам.

Террасы подразделяют на гребневые, траншейные и ступенчатые (рис. 7.11, *б, в, г*). Гребневые террасы устраивают при уклонах 0,02. . .0,12,

ширине валов 18...25 м и высоте 25...40 см. Наиболее распространены ступенчатые террасы, сооружаемые при уклоне 0,12...0,25; ширина их более 3 м, поверхность горизонтальная или с обратным уклоном не более 0,12. Траншейные террасы создают при уклонах 0,09...0,18 и более. В районах сильных ливней при уклонах 0,1...1 террасы дополняют канавами (рис. 7.11, *д*).

Нагорные канавы — открытые каналы для задержания поверхностных вод. Проектируют их обычно глубиной 1...2 м. Расстояние между нагорными канавами определяют аналогично расстоянию между земляными валами. Объем перехватываемого склонового стока вниз по течению нагорной канавы увеличивается

$$Q = L\sigma hl, \qquad (7.8)$$

где l — длина канавы; h — глубина склонового потока; σ — коэффициент поверхностного стока, при отсутствии данных определяют по таблице 7.8.

7.8. Коэффициент поверхностного стока

Водопроницаемость грунтов	Коэффициент фильтрации, м/сут	Уклон водосборной площади		
		слабый (<0,01)	средний (0,01...0,05)	большой (>0,05)
Хорошая	2	0,1...0,2	0,15...0,25	0,2...0,3
Средняя	1	0,15...0,25	0,2...0,3	0,25...0,4
Ниже средней	0,5	0,2...0,3	0,25...0,45	0,35...0,6
Слабая	0,1	0,25...0,4	0,3...0,6	0,5...0,75
Мерзлый грунт	—	0,3...0,6	0,4...0,75	0,8...0,95

Рекомендуют увеличивать и сечение канавы по длине.

Уклоны канав назначают из условия недопущения заиления и размыва. Допускаемые незаиляющие скорости принимают не менее 0,3 м/с для канав глубиной 1 м, а неразмывающие — по таблицам 6.12...6.15 в зависимости от грунтов склона.

При больших скоростях канавы облицовывают бетоном, железобетоном, асфальтом и другими материалами или заменяют сборными железобетонными лотками.

Для закрепления дна донных и склоновых оврагов устраивают *поперечные сооружения* — запруды, пороги, плотины. Широко применяют *низкие задерживающие запруды*, аналогичные устраиваемым на каналах (см. рис. 7.5). Они просты в исполнении и мало подвержены разрушениям. После их заиления создается растительный покров, который выполняет их функцию. Наиболее эффективны временные запруды высотой 25...30 см. Действие запруды распространяется на длину склона $L = h/(i_1 - i_2)$, где h — высота запруды; i_1, i_2 — уклоны соответственно русла и отложившихся наносов.

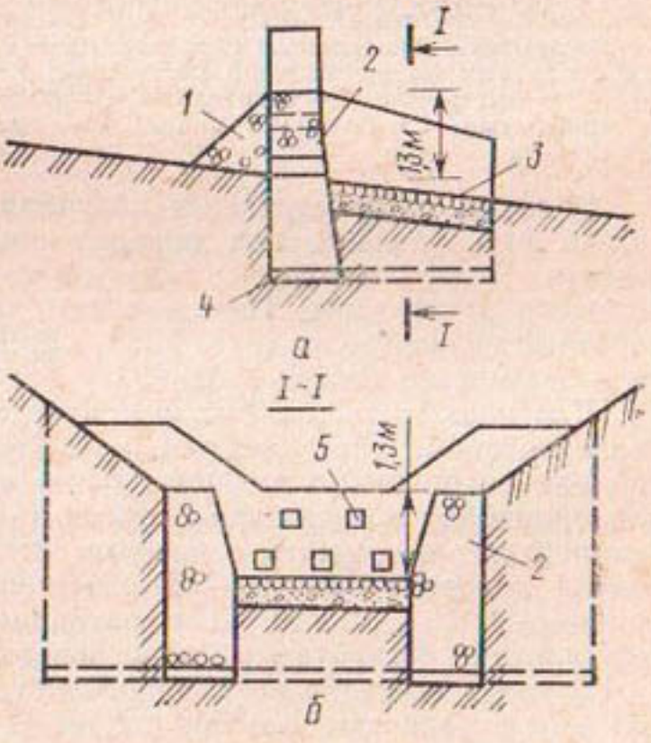


Рис. 7.12. Запруда из бутового камня с дренажными отверстиями:

а — продольный разрез; *б* — поперечный разрез; *1* — обсыпка дренажных отверстий; *2* — бутовая кладка; *3* — крепление камнем по щебню; *4* — щебеночная подготовка; *5* — дренажные отверстия размером 200×200 мм

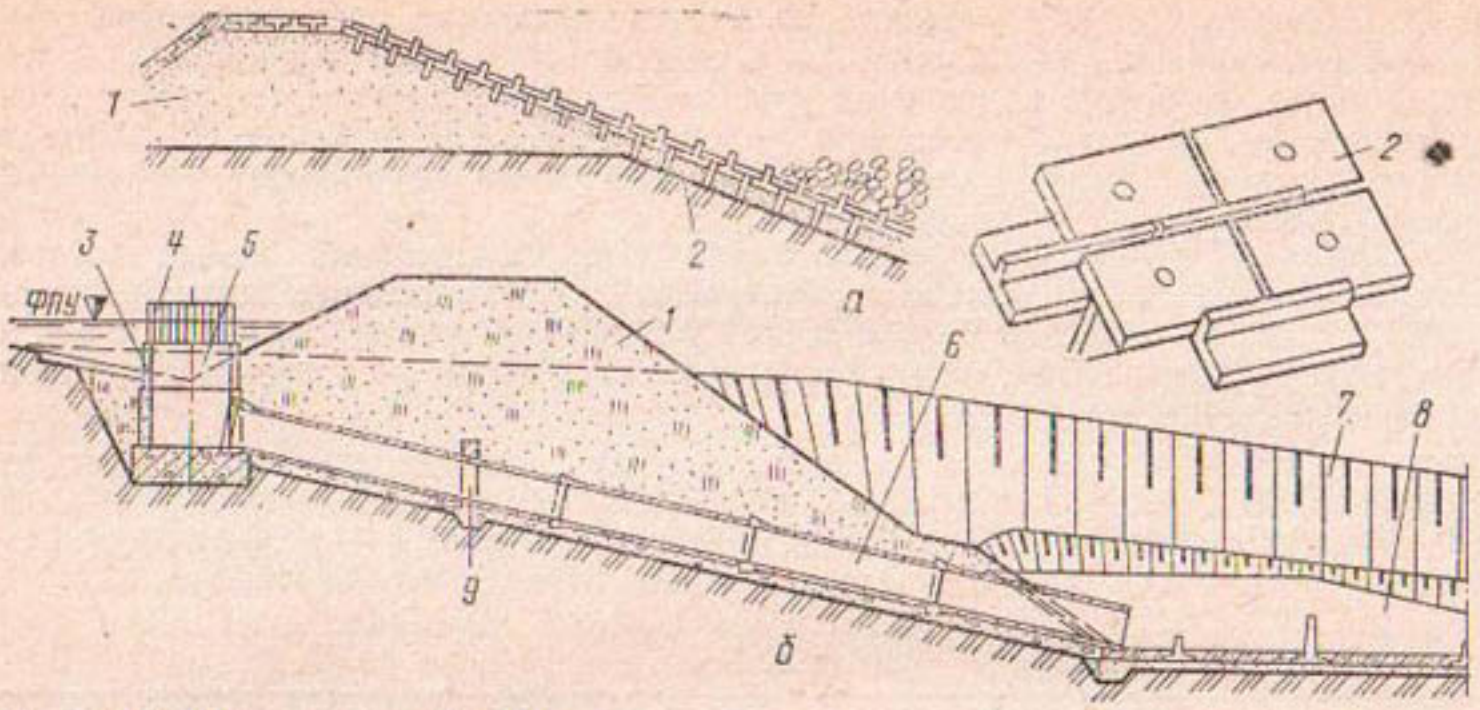


Рис. 7.13. Противоэрозионные плотины:

а — с облицовкой водосливного откоса; *б* — с трубчатым водосбросом; *1* — плотина; *2* — облицовка водосливного откоса; *3* — водосливное отверстие; *4* — сороудерживающая решетка; *5* — входной оголовок; *6* — трубопровод; *7* — естественный откос; *8* — водобойный колодец; *9* — диафрагма

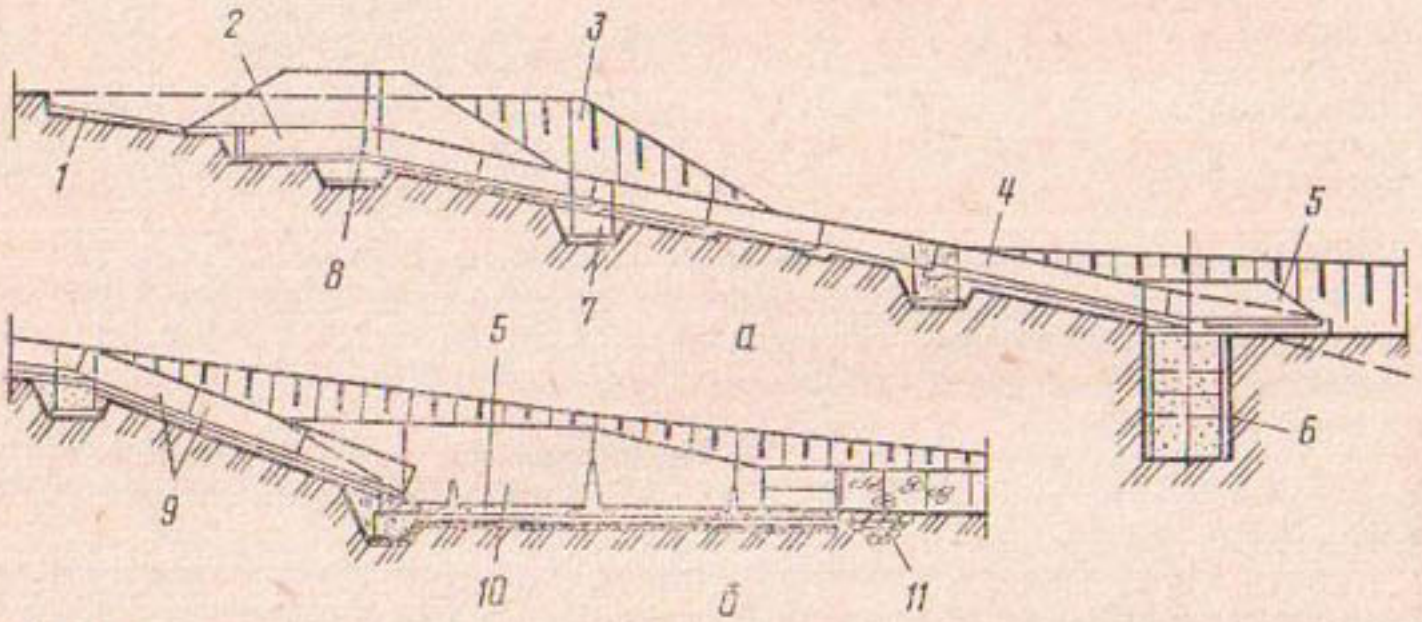


Рис. 7.14. Водосбросы противоэрозионных сооружений в равнинных условиях:

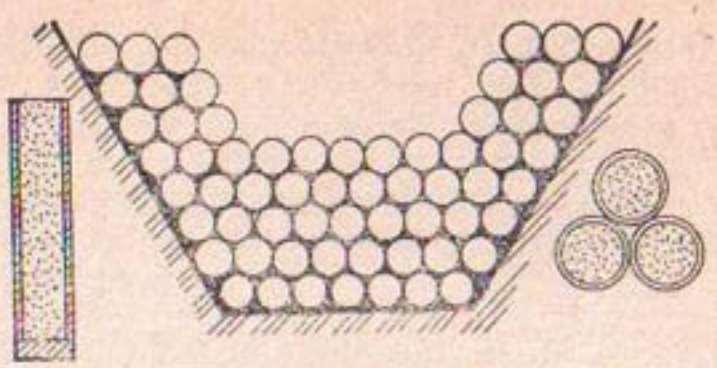
а — быстроток с консольным гасителем; *б* — быстроток с гасителем и порогом; *1* — крепление плитами по щебеночной подготовке; *2* — входной оголовок; *3* — посев многолетних трав; *4* — быстроток; *5* — гаситель; *6* — колодец; *7* — железобетонный сопрягающий узел; *8* — диафрагма; *9* — лотковый канал; *10* — крепление из монолитного бетона; *11* — упорная призма

Большое распространение получили запруды из фашин, плетней, дерева, кольев ивы. Однако, как показал опыт эксплуатации, они быстро разрушаются. Более долговечны запруды из утрамбованных глин, грунтоцемента, бетонные и каменные. Перспективны запруды с дренажными отверстиями и обратными фильтрами (рис. 7.12), обеспечивающие задержание твердого стока и повышение базиса эрозии.

Противоэрозионные плотины отличаются от запруд своими размерами и более высокими требованиями к устойчивости. Сооружают их обычно из сухой или смешанной каменной кладки с применением бетона и железобетона для облицовки водосливного откоса (рис. 7.13, *а*). Плотины из сухой кладки рекомендуют сооружать с низовым откосом 1 : 4...1 : 5, шириной по гребню, равной половине высоты. Для каменной кладки на растворе низовой откос принимают 1 : 5...1 : 10. Для равнинных условий хорошо зарекомендовали себя плотины с трубчатыми водосбросами (рис. 7.13, *б*).

Для прекращения роста оврагов вершины их закрепляют подпорной стенкой или устраивают водосбросы, чаще всего в виде лотков-быстротоков из

Рис. 7.15. Наносоперехватывающая водопроницаемая плотина из некондиционных асбестоцементных или бетонных труб



специальных сборных секций прямоугольного сечения (рис. 7.14). Для увеличения отлета струи от вершины оврага устраивают консольный сброс, а чтобы уменьшить воронку размыва в НБ, в конце консоли устанавливают зубчатые трамплины, которые расщепляют падающую струю. За водосбросом в НБ устанавливают гасители энергии в виде водобойных колодцев или водобойных стенок. Колодцы выполняют из бетона, железобетона и каменной кладки. Глубина заложения фундаментов поперечных сооружений у места падения струи должна быть ниже уровня ожидаемого местного размыва.

Для аккумуляции крупных наносов в оврагах применяют наносоперехватывающие водопроницаемые плотины из некондиционных асбестоцементных или бетонных труб (рис. 7.15).

Расчеты устойчивости откосов, экрана и защитного слоя противоэрозионно-противоселевых плотин из грунтовых материалов выполняют согласно СНиП 2.06.05—84.

7.8. ПРОТИВОСЕЛЕВЫЕ СООРУЖЕНИЯ

Сели — это наиболее экстремальные проявления эрозионных процессов. Происходят исключительно на горных склонах, сложенных легко разрушающимися породами. Различают грязекаменные (связные плотностью 1800... 2300 кг/м³) и наносоводные (турбулентные плотностью 1100...1800 кг/м³) сели.

Противоселевые гидротехнические сооружения предназначаются для перехвата или безвредного пропуска селевых потоков в обход подзащитных объектов. Подразделяют их на селезадерживающие (плотины и запруды глухие и сквозные), селепропускные (селедуки, подмостовые лотки) и селенаправляющие (берегозащитные и струенаправляющие стены и дамбы). По своим конструкциям они аналогичны соответствующим противоэрозионным и водопроводящим сооружениям, однако отличаются большей устойчивостью и надежностью из-за насыщенности потока каменными включениями.

Глухие селезадерживающие сооружения, располагаемые в русловой части селеносного водотока, служат для полного перехвата твердого стока селя

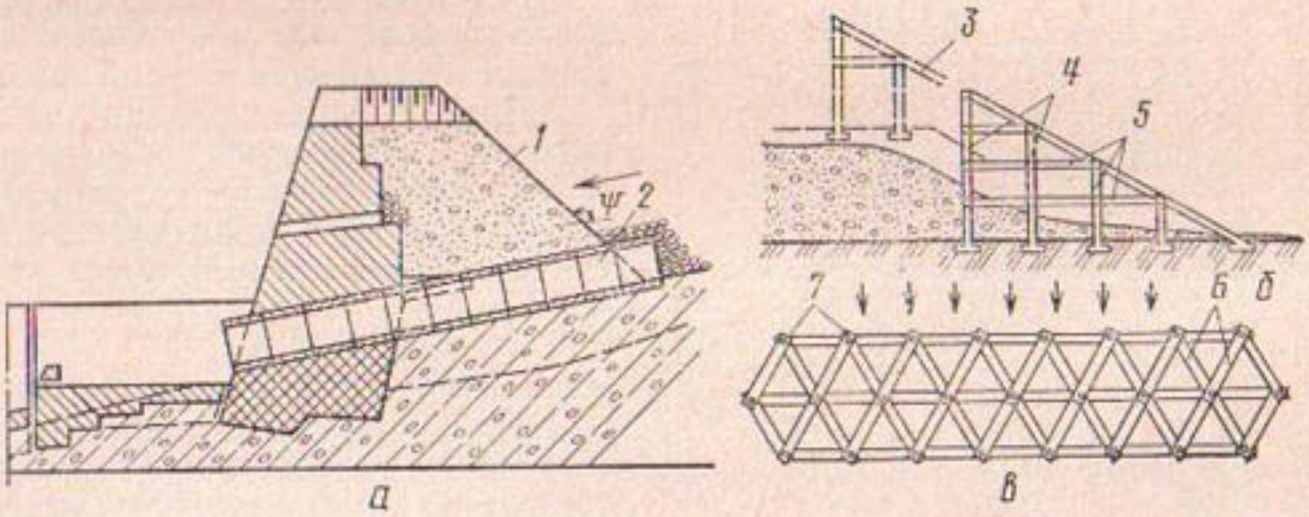


Рис. 7.16. Селезадерживающие сооружения:

а — глухое; *б* — сквозное наклонное; *в* — сквозной селеуловитель (план): *1* — плотина; *2* — водопропускной тракт; *3* — возможная достройка в перспективе; *4* — колонны; *5* — горизонтальные ригели; *6* — железобетонные балки; *7* — трубы

(рис. 7.16, *а*), а сквозные противоселевые сооружения (рис. 7.16, *б*) — для полного или частичного перехвата твердого стока. Последние располагают в русловой части, при выходе водотока на конус выноса или в местах создания предзапрудных емкостей.

Расчет селезадерживающих сооружений. Плотность селевого потока определяют по зависимости

$$\rho_c = \rho_w S_w + \rho_k S_k + \rho_s S_s, \qquad (7.9)$$

где ρ_w, S_w — плотность и объемная концентрация водного потока; ρ_k, S_k — то же для каменных включений; ρ_s, S_s — то же для фракций диаметром менее 1 мм, если они имеются в потоке.

Расходы несвязных (плотностью 1100...1800 кг/м³) и связных (плотностью до 2300 кг/м³) селевых потоков определяют согласно «Инструкции по определению расчетных характеристик дождевых селей ВСН 03—76».

Средняя по сечению скорость при равномерном режиме движения:

для несвязного селевого потока

$$v_{n,m} = 6{,}5H^{2/3}i^{0{,}25}/\sqrt{\rho_c(\rho_d - 1)/(\rho_d - \rho_c)}, \qquad (7.10)$$

для связного потока при обобщенном числе Рейнольдса $Re^* \leqslant 500$

$$v_{c,m} = \rho_c i h^2 (h/H)^2 (1{,}5 - 0{,}5h/H)\, e^{-35[\rho_d - \rho_k^{0{,}11}]}/3000 d_k, \qquad (7.11)$$

где i — уклон дна русла; h — глубина градиентного слоя; $h = H - [50 d_k \exp 23(\rho_d - \rho_k^{0{,}1})/i\rho_c g]$ (d_k — средний диаметр фракций более 1 мм); H — глубина потока.

Вертикальную проекцию расстояния между стержнями Δh сквозного селеуловителя (см. рис. 7.16, *б*) для задержания транспортируемых потоком наносов больше заданного диаметра с учетом эффекта «заклинивания» части наносов мелких размеров принимают по графику, показанному на рисунке 7.17.

Силу удара связного селевого потока о поперечную глухую преграду (сооружение), зависящую от угла наклона напорной грани сооружения ко дну русла (см. рис. 7.16, *а*), определяют по зависимости

$$\begin{aligned} F &= 4{,}5\rho_c S v^2 \sin\psi && \text{при } \psi < \pi/2; \\ F &= 4{,}5\rho_c S v^2 \cos\psi && \text{при } \psi > \pi/2; \\ F &= 4{,}5\rho_c S v^2 && \text{при } \psi = \pi/2, \end{aligned} \qquad (7.12)$$

где S, v — соответственно площадь живого сечения и скорость селя до удара; Ψ — угол между напорной гранью сооружения и перпендикуляром к бытовому дну водотока, при вертикальной напорной грани Ψ равен углу наклона дна русла к горизонту.

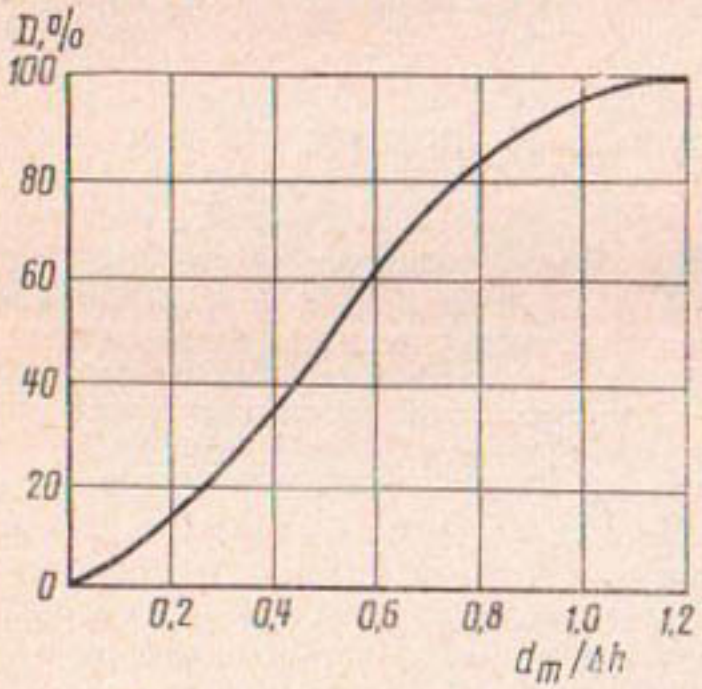


Рис. 7.17. График для назначения расстояний между стержнями сквозного селеуловителя в зависимости от количества задерживаемых наносов:
d_m — средний диаметр задерживаемых наносов; Δh — среднее расстояние между стержнями по вертикали; D — общее количество задерживаемых наносов, в % от объема твердого стока

Устойчивость сооружения на сдвиг определяют по общим требованиям аналогично глухой плотине.

При проектировании селепропускное сооружение рассчитывают для связных селевых потоков с проверкой пропуска и несвязных селей, так как в селеносных логах обычно

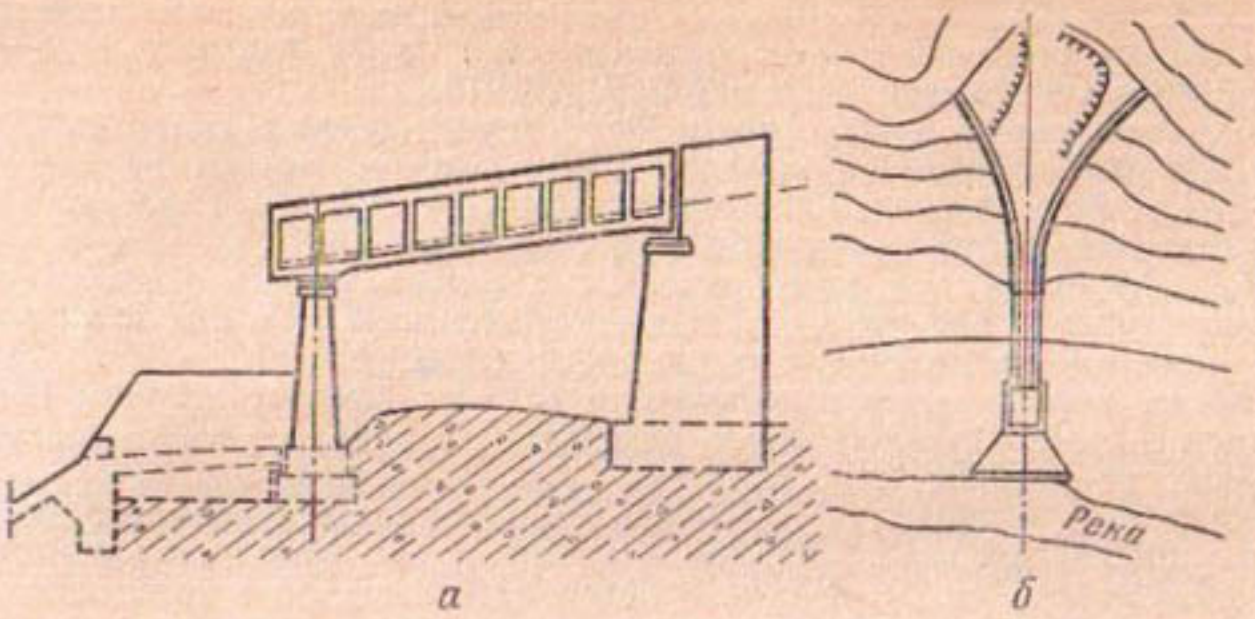


Рис. 7.18. Схема селепропускного сооружения:
а — поперечный разрез; *б* — расположение в плане

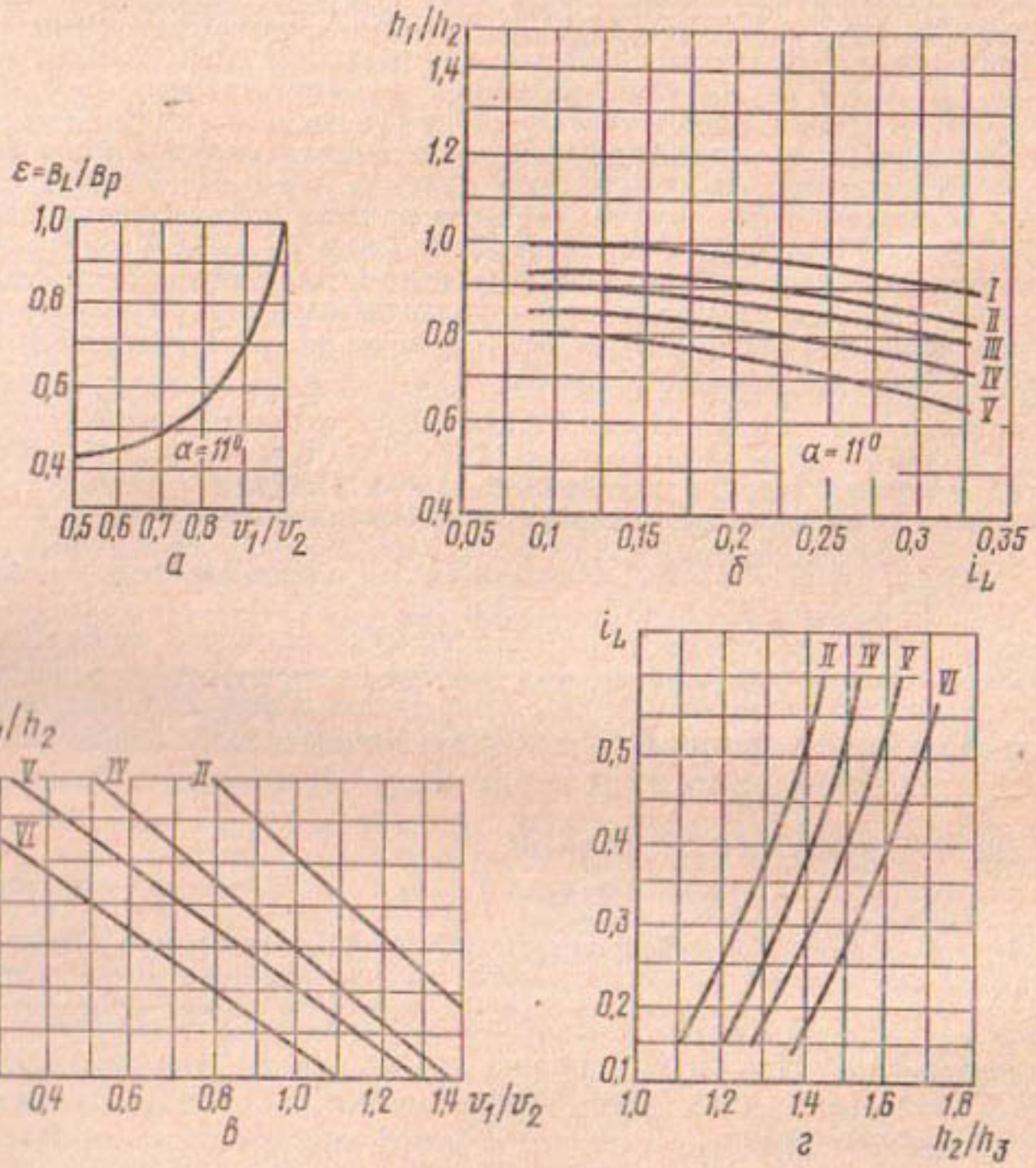


Рис. 7.19. Зависимости для расчета параметров селепропускных сооружений:
I — ε=0,9; *II* — 0,8; *III* — 0,7; *IV* — 0,6; *V* — 0,5; *VI* — 0,4

формируются оба вида потоков. Гидрологические и морфометрические характеристики селеносного лога устанавливают выше входного створа проектируемого сооружения согласно ВСН 03—76.

Входное сечение лотка ориентируют в плане соосно с динамической осью лога для обеспечения нормального входа селевого потока на сооружение (рис. 7.18). Во избежание накопления на выходе отложений селевых выносов концевую часть лотка доводят до береговой полосы реки.

Селевой поток при пересечении им автомобильных и железных дорог, деривационных и оросительных каналов пропускают над или под защищаемым объектом в зависимости от топографических условий.

Расчет селепропускных лотков для связных селевых потоков: основные параметры селепропускного лотка определяют с помощью зависимостей, приведенных на рисунке 7.19. Исходные данные расчета: параметры селевого потока в логе — скорость v_1, глубина h_1, активная ширина лога B_p; параметры лотка — допускаемый уклон i_L и ширина B_L. Угол установки струенаправляющих стен на входе селя в лоток по отношению к динамической оси потока принимают $\alpha \geqslant 11°$. Степень сужения ε подходного лога (русла) устанавливают предварительно в зависимости от активной ширины лога B_p (по топографическим съемкам) и допускаемой ширины селетранспортирующего лотка b_L.

Скорость селевого потока в начальном створе v_2 определяют исходя из зависимости $\varepsilon = f(v_1/v_2)$ (рис. 7.19, *а*), глубина в начальном створе h_2 — по графику $h_1/h_2 = f(i_L)$ (рис. 7.19, *б*) или $h_1/h_2 = f(v_1/v_2)$ (рис. 7.19, *в*), глубину потока при транспортировании по лотку h_3 — по графику $h_2/h_3 = f(i_L, \varepsilon)$ (рис. 7.19, *г*). Высоту бортов селетранспортирующего лотка принимают $1{,}3\,h_3$.

При расчете селетранспортирующих лотковых сооружений на пропуск несвязного селевого потока исходными данными для расчета являются параметры селевого потока в логе — средняя ширина лога в расчетном сечении B_m; общий (удельный) расход жидкого стока $Q_w(q_w)$, уклон i; заданные значения степени сужения ε (в зависимости от топографии местности), угол установки струенаправляющих стен α, уклон лотка i_{Lc}.

Удельный твердый расход (кг/м³), пропуск которого должен быть обеспечен лотком, определяют из условия

$$q_{d,Lc} \geqslant Q_d / b_{Lc}, \tag{7.13}$$

где Q_d — полный твердый расход лога, $Q_d = 2797 i^{4,7} q_w^{(2,4-12,6i)} B_m$; b_{Lc} — ширина входного сечения селетранспортирующего лотка, $b_{Lc} = B_m \varepsilon$.

Удельный жидкий расход, поступающий из лога в лоток,

$$q_{w,Lc} = Q_w / b_{Lc}. \tag{7.14}$$

При заданном удельном жидком расходе селепропускного лотка и соответствующих значениях α, i_L, ε и d_k определяют удельный твердый расход, который может пропустить селетранспортирующий лоток,

$$q_{d,Lc} = q_d (2{,}5\varepsilon - 0{,}031\alpha - 6{,}12i + 0{,}66). \tag{7.15}$$

Полный твердый расход селедука

$$Q_{d,Lc} = q_{d,Lc} b_{Lc}. \tag{7.16}$$

При $Q_{d,Lc} \geqslant Q_d$ селетранспортирующий лоток обеспечивает пропуск твердого расхода, который поступает в лоток из лога водотока. В противном случае транзит твердых наносов не обеспечивается, и расчет проводят заново при новых значениях α, i_L, ε.

Глубину потока в селепропускном лотке определяют исходя из расчетного жидкого расхода, по общепринятым методам с помощью таблиц гидравлических параметров.

Глава 8 МЕХАНИЧЕСКОЕ ОБОРУДОВАНИЕ СООРУЖЕНИЙ

8.1. НАЗНАЧЕНИЕ ОБОРУДОВАНИЯ. КЛАССИФИКАЦИЯ

Механическое оборудование гидротехнических сооружений — комплекс конструкций и устройств, обеспечивающий пропуск воды через сооружения и оперативное выполнение ими эксплуатационных функций.

Подразделяют на две категории в зависимости от размеров объектов.

Первая категория

Крупные сооружения: плотины, водозаборные гидроузлы, насосные станции, перегораживающие сооружения на магистральных каналах и т. д.

Значительный объем металлоконструкций, индивидуальный подход к проектированию, строительству и эксплуатации при незначительной повторяемости технических решений

Вторая категория

Массовые сооружения на мелиоративной сети: регуляторы, аварийные сбросы, вододелители на каналах и лотках; водозаборы, водовыпуски, делители статического напора на трубопроводах; водомерные устройства

Повторяющиеся конструкции, рассчитанные на пропуск расходов воды 0,15...20 м³/с и напоры 0,5...5 м с гидравлической автоматизацией. Целесообразно типовое проектирование

Типовое проектирование металлических конструкций и инженерного оборудования сетевых сооружений предусматривает: достаточную надежность и простоту их эксплуатации; согласование параметров, конструкций и размеров оборудования с типовыми гидросооружениями и выпускаемыми промышленностью железобетонными изделиями для сборных сооружений; использование в конструкциях серийно поставляемых марок металлопроката, метизов и комплектующих изделий.

Совершенствование конструкций, функциональных возможностей и уровня эксплуатации элементов механического оборудования второй категории — важнейший путь повышения эффективности функционирования оросительных и осушительных систем в целом.

Механическое оборудование гидротехнических сооружений включает:

Механизмы и устройства	Назначение
Затворы (главные элементы механического оборудования), их закладные и опорные элементы	Подвижные водонепроницаемые конструкции для перекрытия водопропускных отверстий в целях регулирования уровней или расходов воды, пропуска плавающих тел, судов и т. д.
Сороудерживающие решетки и другие заграждения	Защита водопропускных отверстий против попадания в них плавающих тел
Механизмы и устройства для маневрирования затворами и решетками	Регулирование степени открытия водопропускных отверстий
Решеткоочистительные машины и устройства	Очистка решеток от сора и других плавающих тел

Подъемно-транспортные механизмы и захватные балки	Монтаж, демонтаж и транспортирование элементов механического оборудования в пределах сооружения
Механические и гидромеханические регистрирующие устройства	Регистрация уровней и расходов воды в водопропускных отверстиях

По эксплуатационному назначению затворы подразделяют на:

основные — обеспечивают регулирование пропускаемого расхода воды или поддержание уровней воды в бьефах на заданных отметках; всегда находятся в рабочем состоянии; гарантируют любое маневрирование в текущей воде под напором; время работы основных затворов под напором и в текущей воде не ограничивается;

аварийные — прекращают течение воды в водопропускных сооружениях или снимают напор с основных затворов и гидромашин (турбин, насосов) при аварии. Гарантируют закрытие отверстия в текущей воде при любых возможных напорах на сооружении, время работы под напором в текущей воде может быть ограничено;

ремонтные — временно перекрывают водопропускные отверстия с целью осмотра и ремонта оборудования или частей сооружений; работают в условиях статических нагрузок; допускают маневрирование только в стоячей воде;

аварийно-ремонтные — соединяют функции и признаки аварийных и ремонтных, что дает существенный технико-экономический эффект;

строительные — закрывают водопропускные отверстия только в период пропуска строительных расходов воды; функционально — это основные и ремонтные затворы.

По местоположению перекрываемого отверстия относительно уровня воды затворы подразделяют на поверхностные — не погружены целиком под уровень воды даже при полном закрытии (см. рис. 8.1...8.4) и глубинные — перекрывают отверстия, расположенные ниже уровня воды в одном или обоих бьефах сооружения; условия работы менее благоприятные, чем у поверхностных (см. рис. 8.5...8.7).

По способу пропуска воды различают затворы с пропуском ее с одной стороны (см. рис. 8.1, *а*, *в*) от их подвижной части (обычно из-под затвора), с двух сторон (см. рис. 8.3, *б*) от подвижной части (из-под затвора и над ним) и со всех сторон (см. рис. 8.5, *д*, *е*) от их подвижной части.

Затворы классифицируют также по отдельным *конструктивным признакам.*

Признак	Конструктивный тип затвора
Способ передачи давления воды на сооружение	Передающие давление на быки и устои (см. рис. 8.1, 8,2), на порог сооружения (см. рис. 8.3), на быки и порог (см. рис. 8.4), на контур глубинного отверстия (см. рис. 8.6, *а*...*в*); не передающие давление воды на сооружение (см. рис. 8.7)
Способ движения	Перемещающиеся поступательно (см. рис. 8,1, *а*...*в*), вращающиеся (см. рис. 8.2, *а*, *б*), перекатывающиеся (см. рис. 8.2, *в*), свободно плавающие (см. рис. 8.4, *г*)
Режим работы	Нерегулирующие (см. рис. 8.1, *а*...*г*, 8.2, *а*, 8.3, *а*, 8.4, 8.6, *б*, *в*, *г*). Регулирующие, то есть приспособленные работать при частичном открытии (см. рис. 8,2, *б*, 8.3, *б*, 8.6, *а*, *д*, *е*; 8.7)
Конструкция опорно-ходовых частей	Со скользящими опорами (см. рис. 8.1, *а*), с опорами качения (см. рис. 8.1, *а*), с зубчатыми опорами (см. рис. 8.2, *в*), с опорами гидравлического действия (см. рис. 8.3, *б*)

Способ управления	С механическим приводом (ручным, электрическим) (см. рис. 8.20...8.22), с гидравлическим приводом (см. рис. 8.23), вододействующие (с перемещением затвора под действием напора воды) (см. рис. 8.3, *а*, 8.6, *д*), со смешанным приводом (полувододействующие)
Материал конструкций	Металлические (наиболее распространенные), деревянные (используют как временные), железобетонные, композитные, тканевые

Кроме того, глубинные затворы часто классифицируют по напору: низконапорные (напор до 25 м), средненапорные (25...50 м), высоконапорные (более 50 м). Последняя классификация условна.

8.2. ПОВЕРХНОСТНЫЕ ЗАТВОРЫ

Известно более 90 конструкций поверхностных затворов. Наиболее распространены плоские затворы (более 80%); они просты по конструкции и надежны в эксплуатации. Недостатки их: сложность ходовых частей (для крупных затворов), затруднительный сброс льда и плавающих предметов, ограниченность пролетов, большое тяговое усилие для подъема, необходимость закладных частей в пазах быков и устоев.

На современных мелиоративных системах все больше используют автоматические затворы с электрическими и гидравлическими принципами действия. Поверхностные затворы относятся к регулирующим за редким исключением (двухстворчатые ворота, поворотные рамы, плавучие, некоторые виды клапанных).

Поверхностные затворы, передающие давление воды на быки и устои. Наиболее распространенные виды таких затворов представлены на рисунках 8.1 и 8.2.

Плоские затворы (рис. 8.1, *а*) — плоская ригельная конструкция, поступательно перемещаемая в пазах на скользящих или колесных опорах и передающая давление воды на быки и устои. Воду пропускают из-под затвора или над затвором. Перекрывают отверстия пролетом до 30...40 м при напоре воды до 12...15 м. При форме перекрывающей конструкции в виде ковша или короба затвор называют ковшовым или коробчатым (см. рис. 8.8, *г*). Плоскими затворами оборудуют водосливные плотины, регуляторы на каналах, входные устройства береговых водосбросов, сопрягающих сооружений, речных водозаборов, судоходных шлюзов. Плоские затворы используют как основные, аварийные, ремонтные, строительные.

Шандорные затворы (рис. 8.1, *б*) состоят из отдельных балок (шандор), укладываемых в пазы друг на друга. Используют их при сравнительно малых пролетах отверстий (до 10...12 м) и малом напоре воды (до 5...6 м) в качестве ремонтных заграждений. Маневрирование ими требует больших затрат времени и труда, в том числе ручного.

Плоские многосекционные затворы (рис. 8.1, *в*) — ряд двух- или трехригельных секций, соединенных стальными сцепками. Затвором маневрируют целиком (всей стенкой) как обычным плоским затвором. Извлечение из пазов, транспортирование и монтаж затвора проводят аналогично шандорному.

Плоские сдвоенные затворы (рис. 8.1, *г*) — состоят из двух плоских затворов, перемещающихся в общих пазах независимо друг от друга. При подъеме нижней секции воду пропускают из-под затвора, при опускании верхней секции — над затвором, при этом сбрасывают плавающие тела без потери воды. Поддержание обеих секций в пазах над водой требует меньших высот быков, чем для обычного плоского затвора.

Двухстворчатые ворота (рис. 8.1, *д*) — две плоские створки, вращающиеся вокруг вертикальных осей и поддерживающие друг друга в закрытом положении. Предназначены для поддержания статической разности уровней, маневрируют ими только при отсутствии напора. При полном открытии створки помещаются в углубления («шкафы») в быках. Двухстворчатые ворота пе-

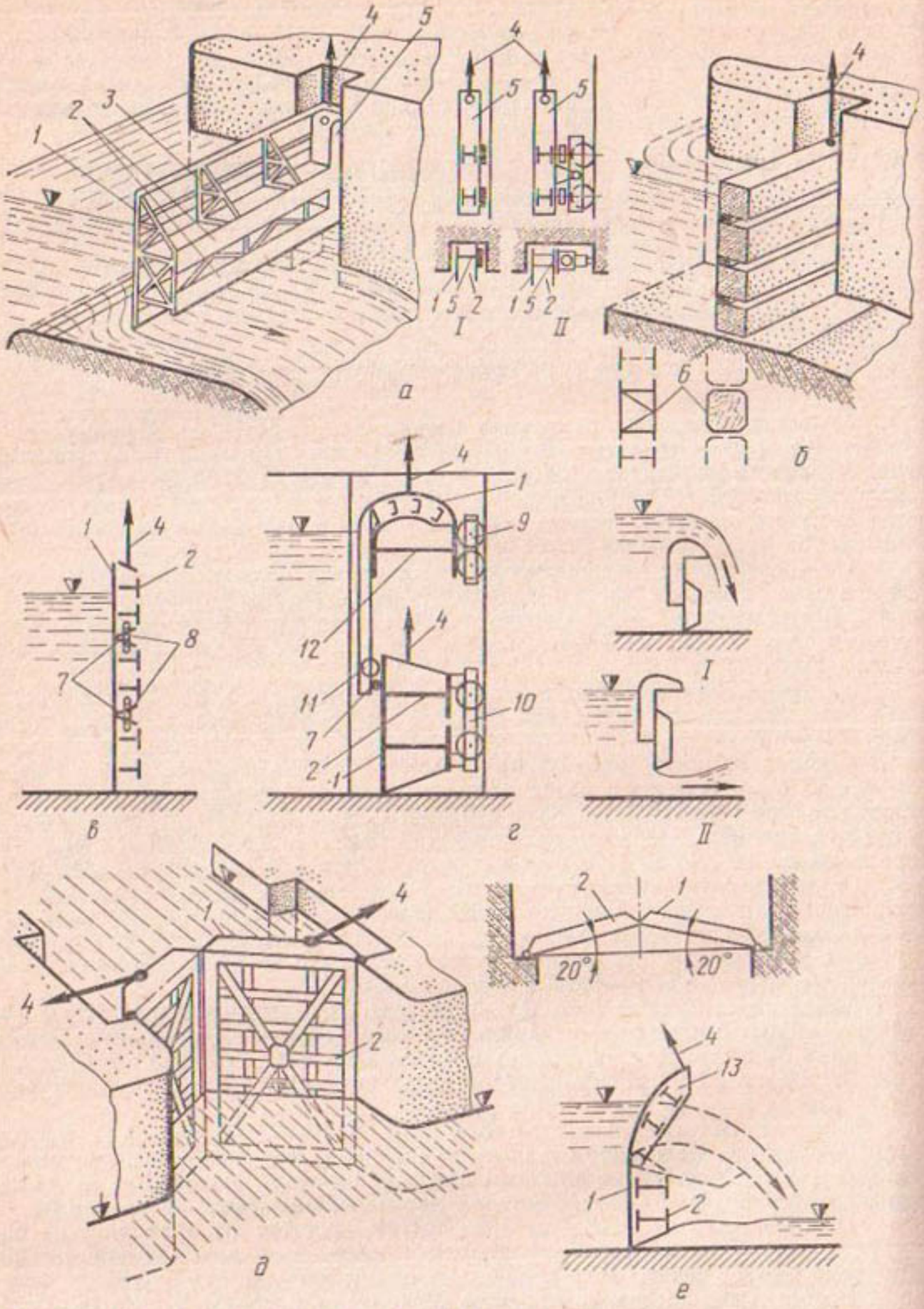
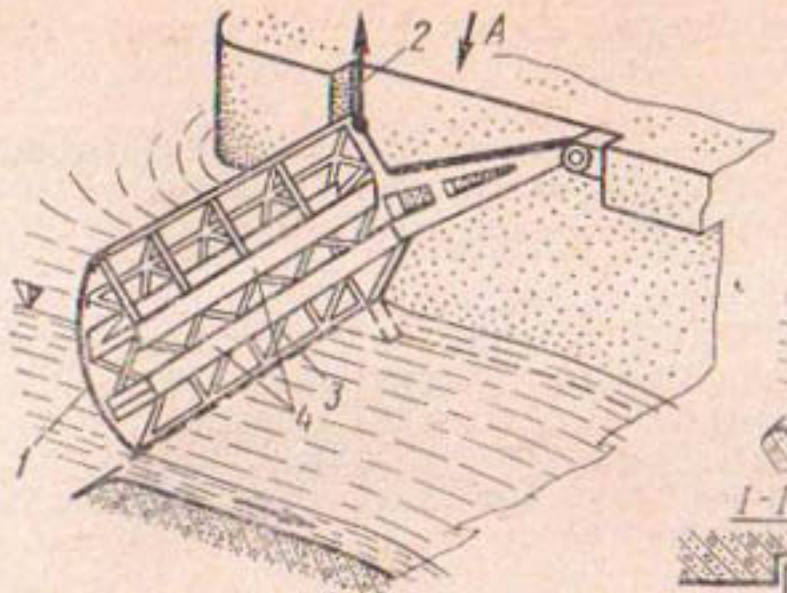
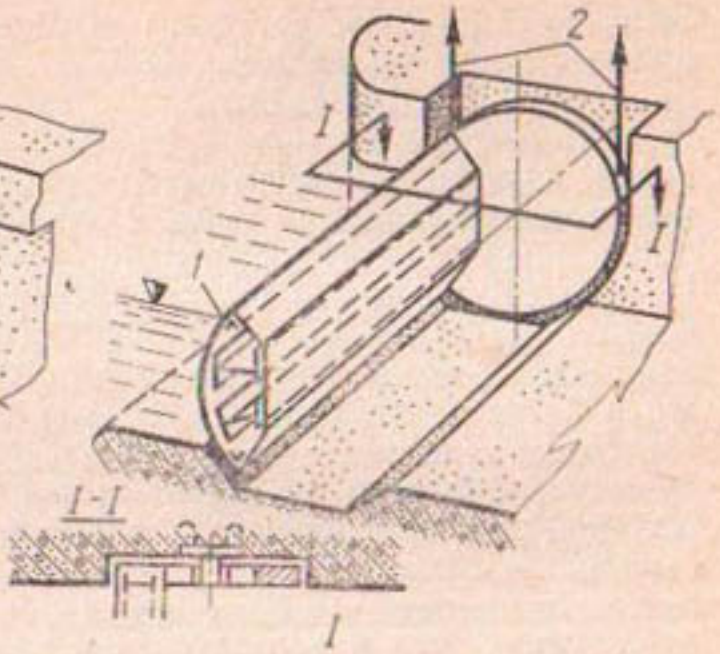
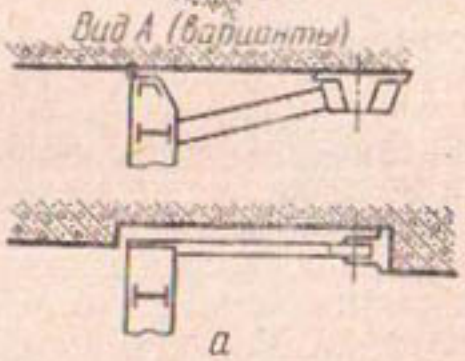


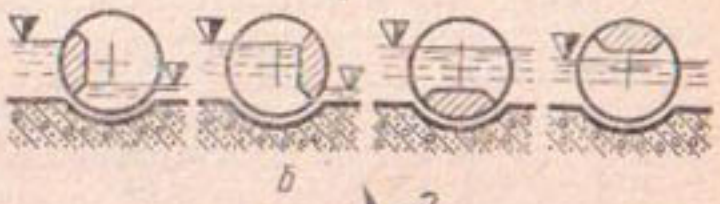
Рис. 8.1. Плоские поверхностные затворы:

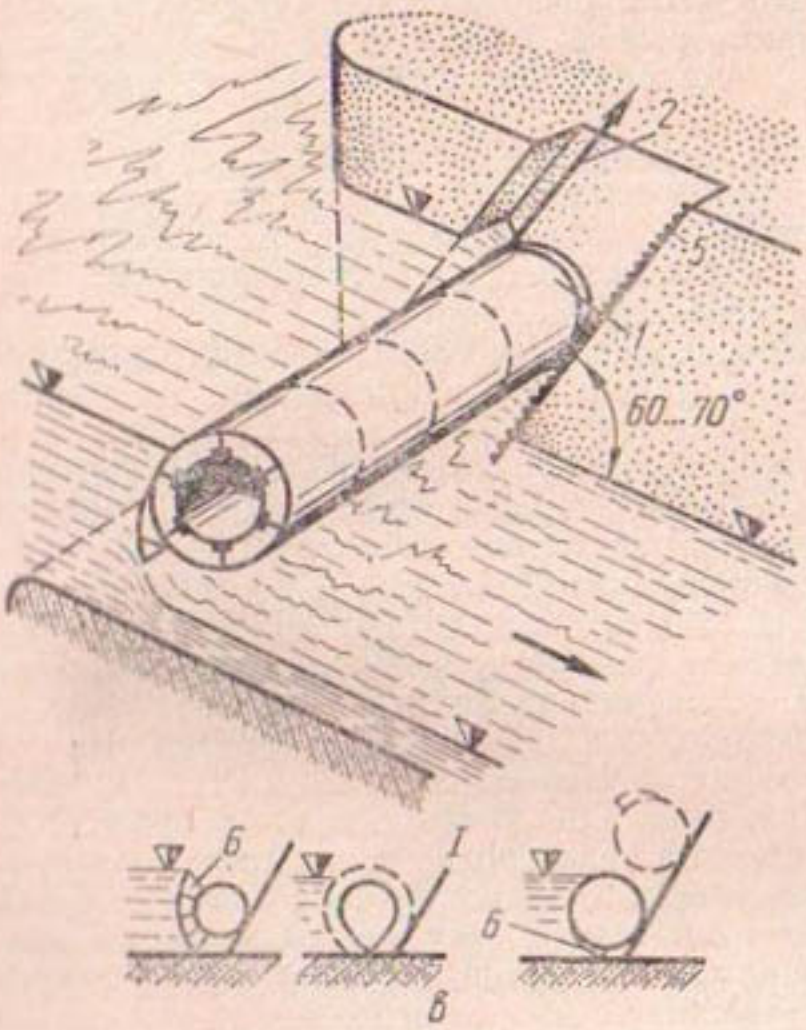
а — плоский; *I, II* — соответственно со скользящими опорами и опорами качания; *б* — шандорный; *в* — многосекционный; *г* — сдвоенный; *I, II* — пропуск расходов соответственно над верхней и из-под нижней секции; *д* — двухстворчатые ворота; *е* — плоский с опускным клапаном; *1* — обшивка; *2* — ригели; *3* — диафрагма; *4* — направление тяги привода; *5* — опорно-концевые стойки; *6* — шандорные балки; *7* — межсекционные уплотнения; *8* — межсекционные сцепки; *9, 10* — колесные тележки соответственно верхней и нижней секции; *11* — межсекционное колесо; *12* — ригель верхней секции; *13* — опускной клапан

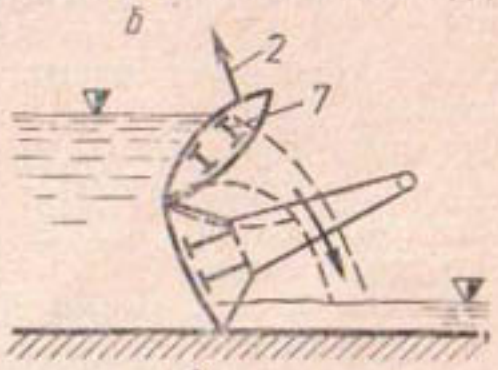


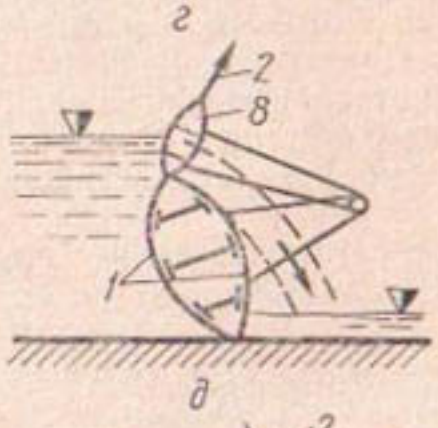












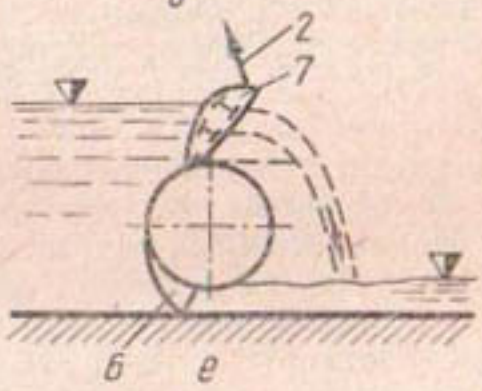


Рис. 8.2. Сегментные и вальцовые затворы:

а — сегментный; *б* — полноповоротный; *1* — возможные положения полноповоротного затвора; *в* — вальцовый; *1* — вальцовые с козырьками; *г* — сегментный с опускным клапаном; *д* — двухобшивочный сегментный с подъемным сегментным клапаном; *е* — вальцовый с нижним козырьком и опускным клапаном; *1* — обшивка; *2* — направление тяги привода; *3* — диафрагма; *4* — ригели; *5* — зубчатая опора; *6* — козырек; *7* — опускной клапан; *8* — подъемный сегментный клапан

рекрывают пролеты до 30 м при напоре воды до 45 м. Применяют в качестве нижних ворот судоходных шлюзов. Относятся к основным затворам, иногда применяют как ремонтные.

Сегментные затворы (рис. 8.2, *а*) имеют сегментообразное ригельное пролетное строение, опирающееся через фермы («ноги») на шарниры, передающие давление воды на быки. Перекрывают отверстия с пролетом до 40...50 м, напор воды может достигать 12...18 м. По степени распространенности занимают второе место после плоских и используют их только в качестве основных: на водосливных плотинах, в регуляторах и других сооружениях на каналах, на входе в открытые водосбросы и водозаборные сооружения, а также в качестве верхних (опускных) ворот судоходных шлюзов.

Полноповоротные (сегментные уравновешенные) *затворы* (рис. 8.2, *б*) — жесткая, обшитая со всех сторон трубообразная балка. Ее фланцы со встроенными противовесами опираются на шарниры в быках. Привод односторонний, затвор можно повернуть на 360°. Полноповоротные затворы перекрывают пролеты до 30 м при напоре воды до 5...7 м. Применяют их в тех же случаях, что и сегментные, особенно в качестве ворот судоходных шлюзов с головным питанием.

Вальцовые затворы (рис. 8.2, *в*) — трубообразные (обычно круглые) стальные балки, расположенные поперек потока, выкатываемые по наклонным путям на быках и перекрывающие пролеты до 100 м при напоре воды до 9 м. Привод односторонний. Для увеличения высоты перекрываемого отверстия и улучшения гидравлики вальцы могут иметь козырьки. Обычно воду пропускают из-под затвора, реже над затвором для сброса льда и сора без потери воды. В суровом климате предусматривают обогрев внутренней полости вальцов. Вальцовые затворы применяют на водосливных плотинах в качестве основных при необходимости создания больших открытых пролетов для пропуска льда.

Затворы с клапанами (плоские, сегментные, вальцовые) (рис. 8.1, *е*; 8.2, *г*...*е*) имеют на своей верхней кромке клапанный затвор (см. рис. 8.3, *б*), шарниры которого в отличие от обычного клапанного затвора укреплены на основном затворе. Привод клапана независим от привода затвора. Клапан позволяет сбрасывать воду и плавающие тела над затвором.

Поверхностные затворы, передающие давление воды на порог сооружения. Наиболее распространенные виды таких затворов показаны на рисунке 8.3.

Секторные затворы (рис. 8.3, *а*) — пролетное строение в виде сектора кругового цилиндра с двумя, как минимум, водонепроницаемыми обшивками по цилиндрической напорной и одной из радиальных поверхностей. Нагрузка на сооружение передается через шарниры, расположенные вдоль пролета напротив каждой фермы, — диафрагмы. Затвор может быть опущен в нишу (камеру давления) в бетоне (шарниры на флютбете) или поднят над порогом полностью или частично (шарниры выше уровня воды, на быках). Воду и плавающие тела пропускают над затвором или под ним. Как правило, секторные затворы выполняют вододействующими. Напоры воды до 10...12 м; пролет в принципе не ограничен. Применяют на водосбросных сооружениях (плотинах, входных устройствах береговых водосбросов, аварийных водосбросах) в качестве основных для автоматического регулирования уровня, сброса льда и плавающих тел, а также как автоматы на регуляторах уровня и расхода. Затворы с камерой давления недостаточно надежны при обилии наносов.

Клапанные затворы (рис. 8.3, *б*) — плоские стальные конструкции, вращающиеся вокруг горизонтальной оси, чаще всего расположенной вблизи порога. Воду и плавающие тела пропускают над клапаном. При полном открытии клапан укладывают на флютбет. Могут перекрывать пролеты до 60 м при напоре воды до 3...4 м. Используют на плотинах и водозаборных сооружениях при сбросе в НБ льда, шуги и сора с минимальной потерей воды.

Крышевидные затворы (рис. 8.3, *в*) имеют два плоских полотнища, аналогичных клапанному затвору. Для маневрирования затвором полость между полотнищами и флютбетом (камеру давления) заполняют водой с помощью системы труб, полотнища скользят друг по другу, при полном открытии их

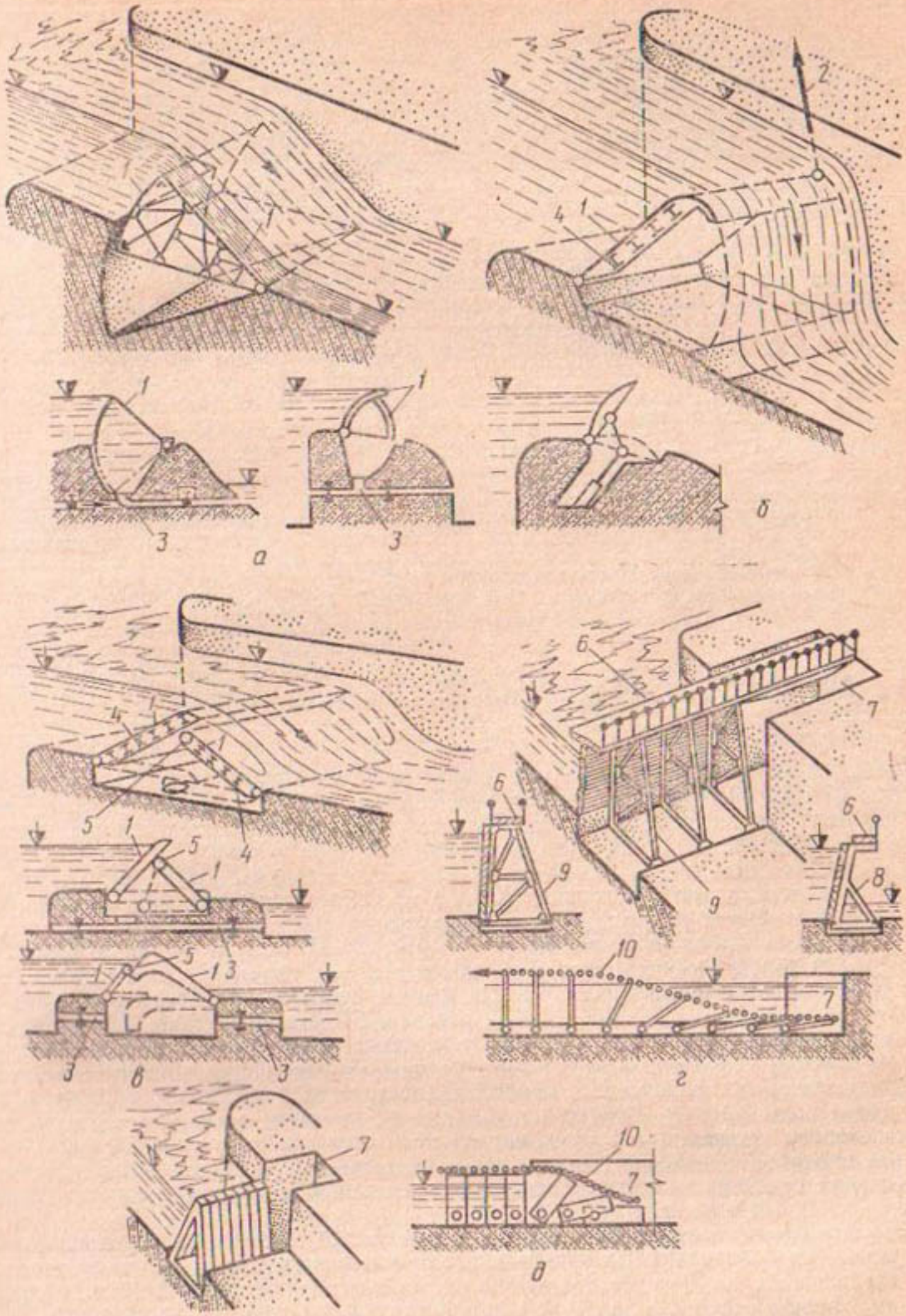


Рис. 8.3. Поверхностные затворы с передачей давления воды на порог сооружения:

а — секторный; *б* — клапанный; *в* — крышевидный; *г* — с поворотными фермами; *д* — с поворотными рамами; *1* — обшивка; *2* — направление тяги привода; *3* — система труб для подачи воды в камеру давления; *4* — ригели; *5* — каток между полотнищами; *6* — служебный мостик; *7* — ниша для укладки ферм и рам, *8* — ферма Пузыревского; *9* — ферма Поаре; *10* — цепь для укладки ферм и рам

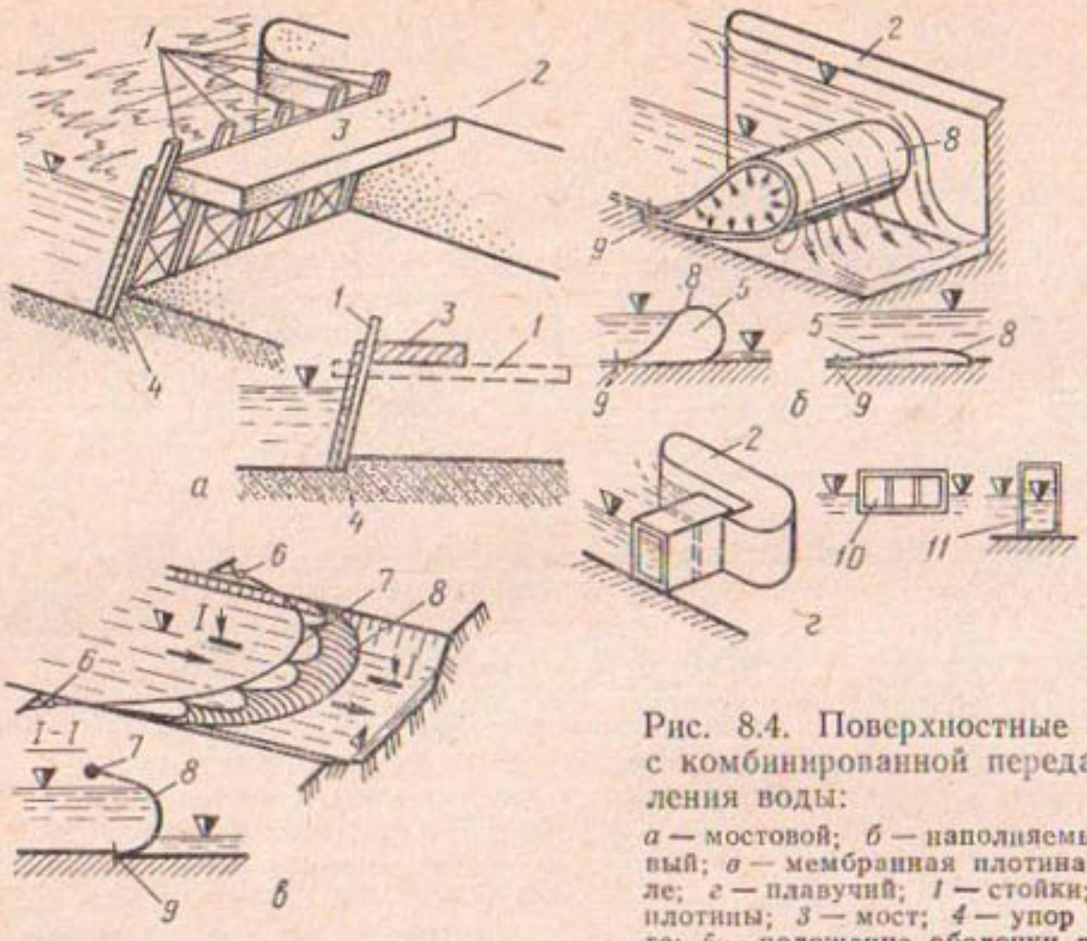


Рис. 8.4. Поверхностные затворы с комбинированной передачей давления воды:

а — мостовой; *б* — наполняемый тканевый; *в* — мембранная плотина на канале; *г* — плавучий; *1* — стойки; *2* — бык плотины; *3* — мост; *4* — упор на пороге; *5* — положение оболочки в пролете; *6* — анкеры заделки несущего троса; *7* — несущий трос; *8* — водонепроницаемая ткань; *9* — крепление оболочки ко дну; *10* — батопорт на плаву; *11* — батопорт на месте

укладывают на флютбет. Воду и плавающие тела пропускают над затвором. Пролеты до 50 м при напоре воды до 7...8 м. Затвор применяют в качестве основного на низконапорных водосливных плотинах для точного регулирования уровней, пропуска льда и плавающих тел, а также плотов и судов на лесосплавных и судоходных реках (во время паводка, когда при открытом затворе перепад не превышает 0,1...0,3 м). Плохо работает при обилии наносов и в зимних условиях.

Затворы с поворотными фермами (рис. 8.3, *г*) состоят из ряда плоских ферм, шарнирно укрепленных на флютбете в 1,5...3 м друг от друга и соединенных служебным мостиком. На фермы опираются плоские деревянные или стальные щитки без уплотнений, устанавливаемые с мостика. Для пропуска воды щитки снимают, разбирают мостик, фермы поворачивают вокруг шарниров и укладывают друг на друга на флютбет. Перекрывают отверстия практически неограниченных пролетов (построенный достигает 200 м) при напоре воды до 5 м. Работы по укладке и установке затвора требуют значительного времени (до 2 сут), затвор не может работать зимой и неприемлем при обилии наносов. Применяют в качестве основного на реках и каналах для создания сезонного регулируемого подпора и в качестве ремонтного в судоходных шлюзах или на плотинах.

Затворы с поворотными рамами (рис. 8.3, *д*) состоят из ряда плоских статически неопределимых треугольных рам шириной 0,6...1 м без затяжек, закрепленных на флютбете шарнирами. Прилегая вплотную друг к другу, рамы перекрывают отверстие без дополнительных щитков и уплотнений. Затвор работает только в предельных положениях — открытом или закрытом. На флютбет рамы укладывают аналогично фермам предыдущих затворов. Пролеты и напоры такие же, как и для затворов с поворотными фермами. Используют как ремонтный в судоходных сооружениях, на плотинах перед большепролетными основными затворами и сооружениями на каналах, а также как основной на судоходных и лесосплавных водотоках для создания временного нерегулируемого подпора.

Поверхностные затворы с комбинированной передачей давления воды. Основные виды таких затворов даны на рисунке 8.4.

Стоечно-плоские (мостовые) затворы (рис. 8.4, *а*) — ряд стоек (рам), опирающихся на уступ флютбета и мост между устоями (быками), с навесными деревянными, реже металлическими, щитами. Расстояния между стойками — 2...4 м. Пролет ограничен только конструкцией моста (до 60 м), напор воды 2...3 м (в отдельных случаях до 6...7 м). Используют как основные затворы для временного регулируемого подпора на лесосплавных и судоходных водотоках или как ремонтные затворы на сооружениях, имеющих подходящие мосты.

Наполняемые затворы и мембранные плотины (рис. 8.4, *б*, *в*) — соответственно замкнутые и незамкнутые мягкие оболочки, изготовленные из прочных синтетических (иногда армированных) тканей, закрепляемые на пороге сооружения и на устоях или берегах.

Наполняемые затворы (см. рис. 8.4, *б*) перекрывают отверстия в зависимости от степени заполнения оболочки водой, воздухом (зимой) или смесью вода — воздух. Затвор может поддерживать напор воды до 5...6 м, пролеты 10...30 м, в принципе могут быть и большими. Область применения — в качестве основных затворов для перекрытия отверстий с большими пролетами на плотинах, реках и каналах, для пропуска судов и плавающих тел, создания временного или постоянного подпора. Затвор не применяют в условиях сурового климата, а также при наличии плавающих тел, повреждающих тканевую оболочку.

Мембранные плотины (рис. 8.4, *в*) передают силы растяжения ткани напором воды на несущий трос, заанкеренный на берегу или в быках. Существенного перелива воды не допускают. Используют их для создания временного (сезонного) подпора на водотоках.

Плавучие затворы (батопорты) (рис. 8.4, *г*) — плавающая подобно обычному судну конструкция (стальная или железобетонная), доставляемая в пролет на плаву (буксиром). После наполнения внутренних отсеков водой затвор погружается и работает как обычный плоский. Используют в качестве ремонтных или временных строительных заграждений в стоячей воде, если операция перекрытия отверстий редкая и маловероятная и создание стационарного ремонтного затвора экономически нецелесообразно. Плавучие затворы можно установить и в том случае, если приспособления для закрытия отверстий не были предусмотрены.

8.3. ГЛУБИННЫЕ ЗАТВОРЫ

Функции глубинных водопропускных отверстий более ограничены, чем поверхностных, и виды их менее разнообразны. Отличительная особенность глубинных затворов — наличие затворной камеры.

Затворная камера — это часть водовода, служащая для размещения самого затвора и сопрягающая подводящие и отводящие участки водовода с местом установки затвора. Стенки камеры от динамических, кавитационных и абразивных воздействий потока защищены стальной облицовкой, связанной с закладными частями затвора. По конструктивному исполнению их разделяют на затворные камеры, облицовка которых омоноличена с бетоном сооружения, и камеры в виде самонесущего стального корпуса. Последние применяют на напорных трубопроводах.

Глубинные затворы, передающие давление воды через опорно-ходовые части. Для этих затворов характерны омоноличенные с сооружением затворные камеры (рис. 8.5).

Плоские глубинные затворы (рис. 8.5, *а*) отличаются многоригельными конструкциями с жесткими диафрагмами и мощными опорно-концевыми стойками. Опоры — скользящие, колесные или катковые, уплотняющие устройства — по всему периметру перекрываемого отверстия. Применяют при напоре воды до 180...200 м, площади отверстий при максимальных напорах достигают 30...40 м². Затворы используют для перекрытия отверстий водосбросов, водоспусков, водовыпусков и водозаборов, водоприемников ГЭС и НС. Их устанавливают в диафрагменных и трубчатых регуляторах на каналах.

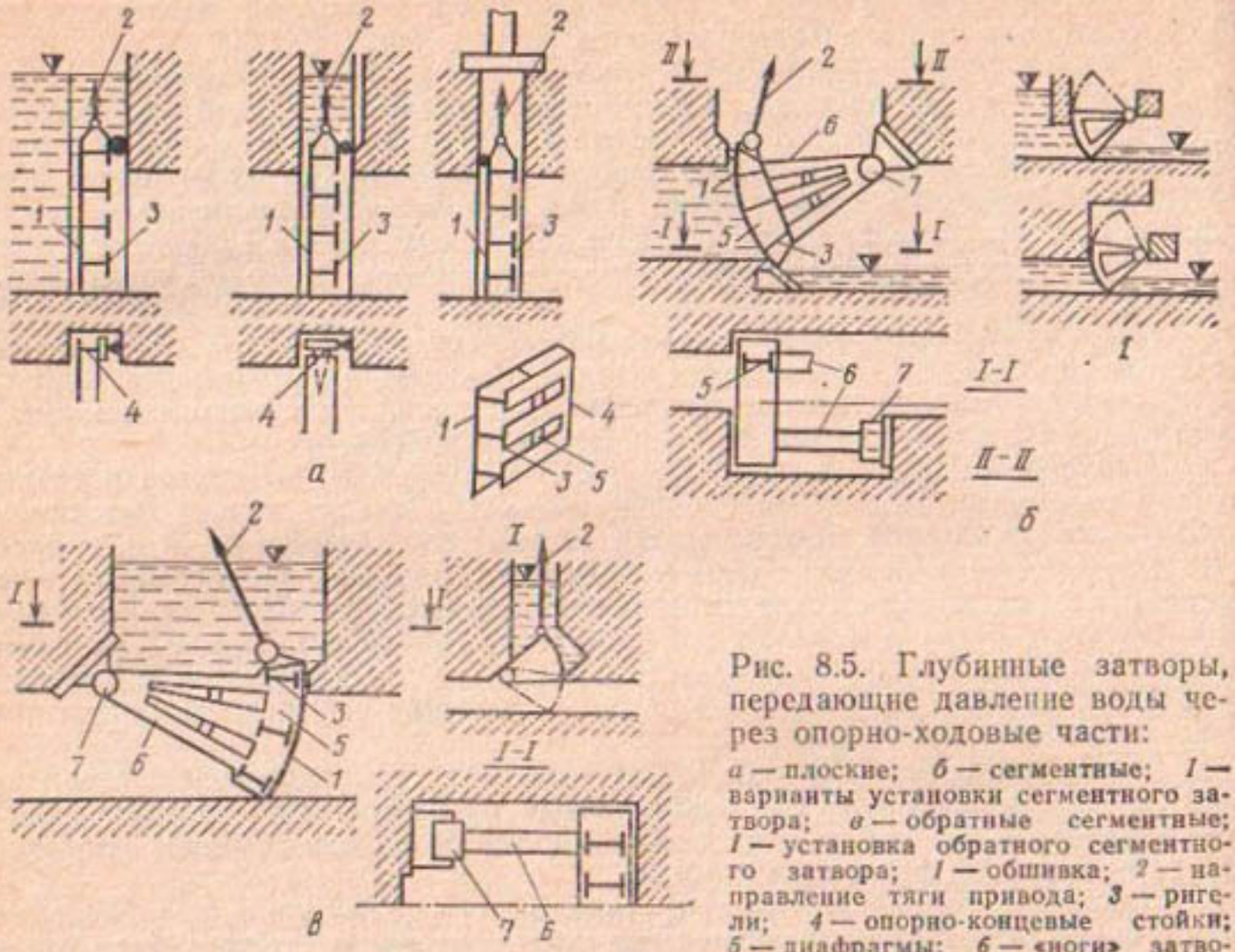


Рис. 8.5. Глубинные затворы, передающие давление воды через опорно-ходовые части:

а — плоские; *б* — сегментные; *1* — варианты установки сегментного затвора; *в* — обратные сегментные; *1* — установка обратного сегментного затвора; *1* — обшивка; *2* — направление тяги привода; *3* — ригели; *4* — опорно-концевые стойки; *5* — диафрагмы; *6* — «ноги» затвора; *7* — опорные шарниры

Это — наиболее распространенный вид затворов водопроводных галерей судоходных шлюзов; в шахтных шлюзах их используют так же, как и нижние ворота в камере. Плоские глубинные затворы широко применяют как основные (до 86% глубинных затворов), а в качестве аварийно-ремонтных, аварийных или ремонтных — практически всегда.

Сегментные глубинные затворы (рис. 8.5, *б*) имеют многоригельное пролетное строение, опорные шарниры вынесены на железобетонную балку, расположенную в пролете выше потолка отводящего водовода. Уплотняющее устройство крупных затворов помещено на закладных частях, для чего сделаны полупазы и донные пороги. Применяют при напоре воды до 180...200 м, площадь перекрываемых отверстий 40...45 м². Используют в качестве основных в водосбросах, водоспусках, водовыпусках и водозаборах, а также в диафрагменных регуляторах на каналах.

Обратные сегментные глубинные затворы (рис. 8.5, *в*) по конструкции аналогичны обычным сегментным, но их «ноги» и опорные шарниры расположены со стороны ВБ и работают на растяжение и отрыв от бетона. Уплотняющие устройства помещены только на подвижной части. Управление — через шахту, расположенную с напорной стороны и заполненную водой; механизмы обычно установлены на незатопляемых отметках. Применяют в качестве основных затворов при напоре воды до 50...60 м и площадях отверстий до 60...70 м².

Глубинные затворы, передающие давление воды через корпус. Наиболее распространенные виды таких затворов даны на рисунке 8.6. *Плоский затвор* — задвижка (рис. 8.6, *а*), внутри литого (чугунного или стального) корпуса поступательно перемещается диск, расклинивающийся при полном закрытии между обработанными бронзовыми кольцами. Задвижки выпускают серийно диаметром до 1500 мм на напор воды до 100 м, при меньшем диаметре — на напор до 250...300 м. При диаметре до 750 мм задвижки могут открываться и закрываться при наличии перепада давлений, то есть использоваться как основные и аварийные затворы под напором. При большем диа-

метре они открываются и закрываются при выравненных давлениях и используют их как ремонтные затворы. Для выравнивания давлений имеется обводная труба — байпас. При напоре воды до 25...30 м задвижками можно регулировать расход воды (с согласия завода-изготовителя), при большем напоре они работают только в предельных положениях. Задвижки широко применяют в качестве основных затворов на трубчатых водовыпусках с напором воды до 15 м, в глубинных водозаборах на закрытых оросительных системах, в системах управления вододействующими затворами, на байпасах для выравнивания давлений вокруг крупных затворов при их подъеме. При напоре более 50...70 м следует применять задвижки только со стальным корпусом.

Дисковый (дроссельный) затвор (рис. 8.6, *б*) — в стальном корпусе размещен чечевицеобразный диск, который при полном закрытии отверстия разворачивается в плоскость, почти перпендикулярную оси трубопровода, и по всей окружности плотно смыкается с уплотняющим устройством. Управление затвором требует небольших усилий, однако он неустойчив при полном открытии и требует надежной фиксации. При угле поворота 10...30 °С подвержен усиленным вибрациям. Область применения — аварийные и ремонтные заграждения глубинных водопропускных трактов любого назначения. Известно применение затворов диаметром 700 мм при напорах воды до 800 м и диаметром 8200 мм при напоре 25 м. Дисковые затворы диаметром до 1500 мм выпускают серийно. При малых диаметрах трубопроводов на закрытых оросительных системах их широко используют в качестве основных.

Шаровой затвор (рис. 8.6, *в*) — вращающийся в стальном корпусе клапан, цилиндрический патрубок которого при полном открытии соединяет с минимальными зазорами подводящую и отводящую части трубопровода. При повороте на 90° клапан боковым, точно обработанным уплотняющим сферическим сегментом соприкасается с седлом на трубопроводе, плотно закрывая отверстие. Для снятия нагрузок на клапан при открытии область затвора извне соединена трубой, снабженной краном, с отводящей частью трубопровода. Шаровые затворы применяют как ремонтные в напорных трубопроводах диаметром 0,5...8 м при напорах воды до 100...300 м.

Поворотный цилиндрический затвор (рис 8.6, *г*) — один или два стальных круговых цилиндра (вальца) в стальном корпусе (одновальцовый и двухвальцовый). Подвижная часть затвора имеет цилиндрическую обшивку, и сила давления воды по всем поверхностям, кроме поверхности выреза, не создает моментов относительно оси вращения, затрудняющих маневрирование. Затворы не подвержены вибрации и устойчивы при всех частичных открытиях под напором, не создают дополнительных его потерь при полном открытии. Перспективны в качестве основных и аварийных.

Игольчатый затвор (рис. 8.6, *д*) — подвижный цилиндр с регулирующей «иглой», перемещающийся поступательно для закрытия или открытия отверстия под действием разности сил, создающейся при различных соотношениях давлений в полостях А и Б. Давление в полости Б всегда близко к давлению ВБ, давление в полости А регулируется в широких пределах выпуском воды по специальной трубе и через отверстие в игле или выпуском воды в НБ по регулирующей трубе. Затвор полностью вододействующий.

Для борьбы с местным вакуумом струя аэрируется по периметру через воздушный коллектор и выбрасывается либо в атмосферу, либо в камеру гашения, то есть в отводящий напорный водовод диаметром в 1,5...2 раза больше диаметра струи. Затвор надежен в эксплуатации, работает без вибраций, обычно без кавитационных повреждений, плавно и точно регулирует расход воды. Используют в качестве основных в водосбросах и водовыпусках при напоре воды до 800 м, диаметр достигает 6500 мм. Применение ограничено из-за сложности изготовления и монтажа, а также сравнительно высокой стоимости.

Конусный (телескопический) затвор (рис. 8.6, *е*) — воду, протекающую между ребрами жесткости, специальный конус отклоняет в стороны и выбрасывает ее в атмосферу полой струей с сильным разбрызгиванием и аэрацией. Толщину струи регулируют с помощью подвижного патрубка (клапана), перемещаемого механизмом вдоль оси затвора. Для борьбы с излишним разбрызгиванием потока используют специальные насадки или камеры гашения

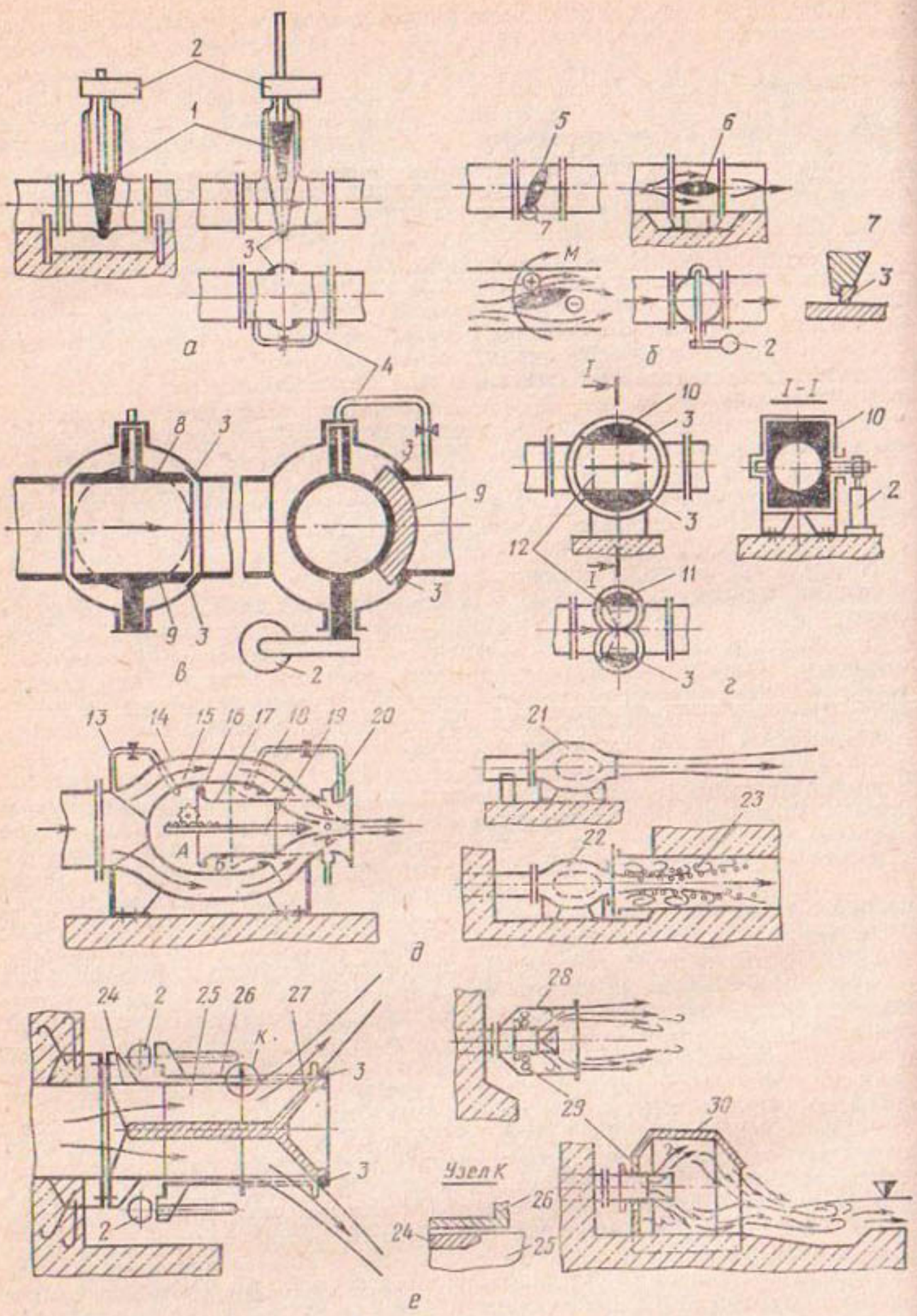


Рис. 8.6. Глубинные затворы, передающие давление воды через корпус:

а — плоские задвижки; *б* — дисковые; *в* — шаровые; *г* — поворотные цилиндрические; *д* — игольчатые; *е* — конусные; *1* — запирающий клиновый диск; *2* — приводы; *3* — уплотняющие элементы (бронзовые или резиновые); *4* — байпас; *5, 6* — положение диска соответственно при закрытом и открытом затворе; *7* — узел А; *8* — патрубок шарового затвора; *9* — уплотняющий сферический сегмент; *10, 11* — вальцы соответственно одновальцового и двухвальцового затворов; *12* — положение вальцов при закрытии; *13* — труба питания полости А; *14* — корпус игольчатого затвора; *15* — ребра, несущие игольчатый за-

(см. рис. 8.6, *е*). Насадку закрепляют на неподвижном патрубке затвора, чтобы струя, отразившись от нее, направилась вдоль оси затвора. Камеру гашения укрепляют за затвором на независимом от него основании. Форму ее стенок подбирают такой, чтобы после отражений и соударений струя поступала в НБ сплошным потоком. Конусные затворы не имеют мест, подверженных кавитационной эрозии, за исключением узла К, где образуется зона отрыва потока. Исполнение этого узла по схеме рисунка 8.6, *е* исключает эту опасность. Конусные затворы широко применяют в качестве основных затворов водосбросов, водоспусков и водовыпусков плотин с напорами воды от 10...20 до 250...300 м при диаметрах отверстий, доходящих до 6,5 м.

Дисковые и шаровые затворы работают только при полном открытии, то есть относятся к нерегулирующим затворам.

Уравновешенные глубинные затворы, не передающие давление воды на сооружение. К ним относят затворы вертикальные цилиндрические, с камерой противодавления и игольчатые с гидравлическим приводом. По режиму работы уравновешенные затворы являются регулирующими.

Вертикальные цилиндрические затворы (рис. 8.7) — подвижные цилиндры, перемещаемые внутри башен, специальных центрирующих или направляющих конструкций. К незатопленным цилиндрическим затворам воду подводят открытым потоком, к затопленным — через окна башен. Давление воды, действующее в радиальном направлении, уравновешивается и таким образом не передается на сооружение. Открытые цилиндры выполняют из стальных колец с ребрами жесткости. Для борьбы с вакуумом и кавитацией через цилиндр подводят воздух. Благодаря всестороннему сжатию водой они достаточно легки и не создают значительных сил трения при перемещении. Сплошные цилиндры (иногда выполняемые из железобетона) вследствие значительного веса, вертикальной нагрузки от воды над ними и от вакуума под затвором требуют больших усилий для перемещения, что ограничивает их диаметры. Затворы, предназначенные только для регулирования расхода воды, а не для плотного перекрытия отверстий, при напоре воды до 10...15 м выполняют без уплотняющих устройств. Цилиндрические затворы имеют диаметры до 12 м с высотой цилиндров до 3...6 м на напор воды до 100 м. Можно использовать как основные (реже аварийные) затворы для башенных водозаборов, водовыпусков или водосбросов при водохранилищных плотинах.

Затворы (плоские, секторные, диафрагменные и др.) с камерой противодавления (например, см. рис. 8.15), расположенной со стороны НБ или над затвором, давление воды в которой уравновешивает давление ВБ. При подъеме затвора преодолевается только его вес и сравнительно незначительные силы трения в обшивках, что облегчает маневрирование ими. Область применения затворов с камерой противодавления — высоконапорные гидроузлы на многоводных реках. В мелиорации — на каналах оросительных и осушительно-увлажнительных систем при регулировании по НБ.

8.4. ТИПИЗИРОВАННЫЕ КОНСТРУКЦИИ ЗАТВОРОВ ДЛЯ МЕЛИОРАТИВНЫХ СИСТЕМ

Ниже дано описание и технические характеристики типовых затворов, наиболее часто встречающихся в мелиоративной практике.

Затворы поверхностные плоские колесные (табл. 8.1) предназначены для перекрытия поверхностных отверстий водопропускных сооружений. Ремонт

твор; *16* — неподвижная капсула; *17* — подвижный плунжер с рабочей «иглой» (пунктиром показано положение полного закрытия); *18* — труба для выпуска воды из полости Б; *19* — механический клапан выпуска воды из полости А через торец «иглы»; *20* — воздухоподводящий коллектор; *21, 22* — установка игольчатого затвора с истечением воды соответственно в атмосферу и закрытый водовод; *23* — область кавитации, не повреждающей стенки водовода; *24* — неподвижный патрубок конусного затвора; *25* — ребра, несущие конус *27*; *26* — подвижный патрубок (пунктиром показано положение полного закрытия); *28* — насадка на конусном затворе; *29* — отверстия для подвода воздуха к струе; *30* — камера гашения на сооружении

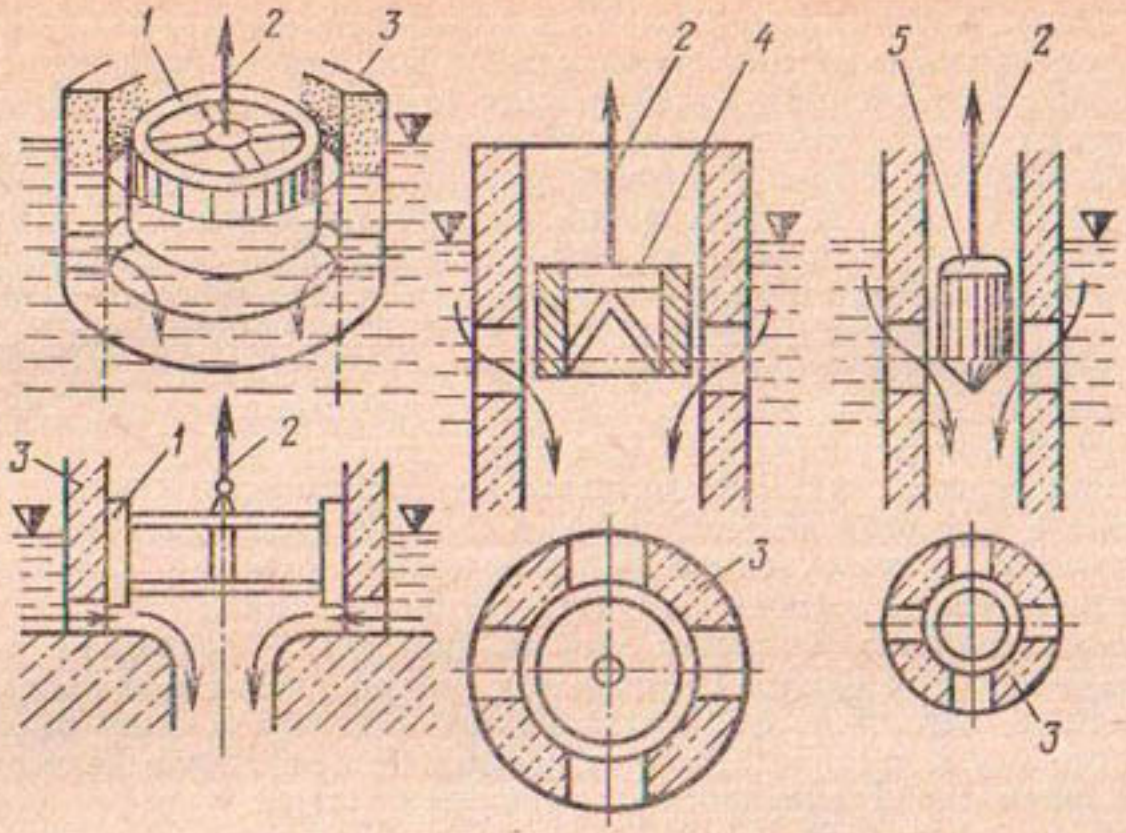


Рис. 8.7. Уравновешенный вертикальный цилиндрический затвор:

1 — полый цилиндр; *2* — направление тяги привода; *3* — направляющие бочарного затвора; *4, 5* — затопленный цилиндр, соответственно открытый и закрытый

затвора возможен только при демонтаже подъемника и подъеме затвора выше пола служебного мостика.

Затворы плоские, сдвоенные (табл. 8.2) предназначены для открытых и трубчатых регуляторов осушительных систем, расход воды — до 10 м³/с.

Затворы плоские с наклонной стенкой — стабилизаторы расхода воды (табл. 8.3), служат для забора заданного расхода при колебаниях уровня воды с напорной стороны. Расходы воды — от 0,1 м³/с до 0,8 м³/с, колебания уровня воды с напорной стороны соответственно от 0,1 до 0,35 м, точность забора воды от +5...12% до —5...9%. Затвор работает (как стабилизатор) только при свободном истечении. Устанавливают на вододелителях, регуляторах-водовыпусках из грунтовых каналов. Расход воды регулируют вручную по специальной шкале путем подъема и опускания затвора.

Затворы плоские скользящие глубинные (табл. 8.4) перекрывают глубинные отверстия трубчатых сооружений.

Затворы плоские, коробчатые (ковшовые) (табл. 8.5) поддерживают расчетные уровни воды перед сооружениями и сбрасывают излишки воды через гребень затвора. Степень открытия регулируется поворотным клапаном в зависимости от уровня воды в канале.

Затвор секторный прислонный, вододействующий (рис. 8.8) автоматически поддерживает заданный уровень воды в одном из бьефов соору-

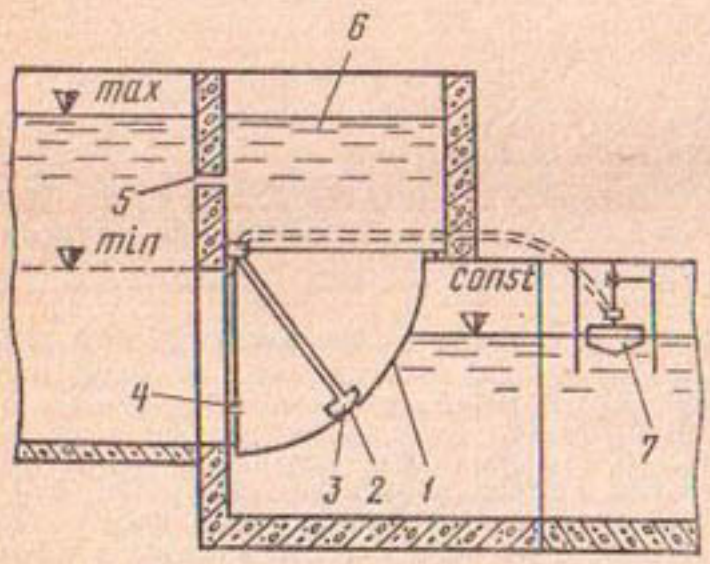
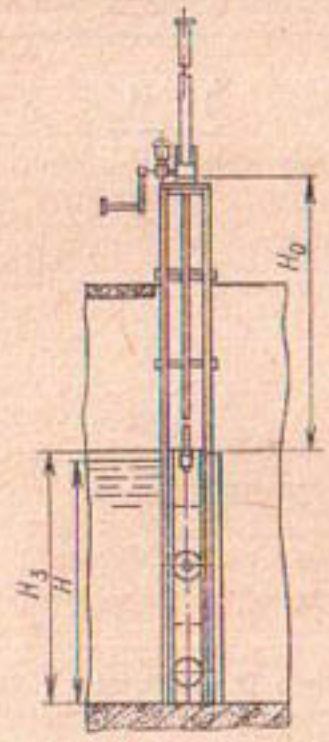


Рис. 8.8. Типовой секторный затвор:

1 — секторный затвор; *2, 4* — соответственно сливное и входное отверстия; *3* — клапан; *5* — входное отверстие камеры; *6* — камера противодавления; *7* — поплавковый датчик уровня

8.1. Технические характеристики поверхностных плоских колесных затворов

Шифр затвора	Схема	Размеры, мм				Марка подъемника	Масса с подъемником, кг
		$L_з$	$H_з$	$H_р$	H_0		
ПК4-2		4258	2100	4450	2458 / 2426	5ЭВД / 5ВД	1705,6 / 1705,6
ПК4-2,5		4260	2600	5450	2958 / 2926	5ЭВД / 5ВД	2085,6 / 2085,6
ПК5-2,5		5312	2600	5450	2966 / 2926	10ЭВД / 10ВД	3005,6 / 2930,6
ПК3-3		3060	3100	6550	3566 / 3526	5ЭВ / 5В	2142,6 / 2072,6
ПК4-3		4312	3100	6450	3466 / 3426	10ЭВД / 10ВД	3111,2 / 3036,2
ПК5-3		5312	3100	6450	3466 / 3426	10ЭВД / 10ВД	3481,7 / 3406,7
ПК6-3		6312	3100	6450	3466 / 3426	10ЭВД / 10ВД	3934,3 / 3859,3

Примечание. В шифре затвора приведены $B \times H$, где B — ширина перекрываемого отверстия, м; H — напор перед затвором, м; $L_з$, $H_з$ — длина и высота затвора; $H_р$ — высота рамы; H_0 — расстояние от проушины затвора (штанги) до подошвы подъемника. В числителе приведены данные, соответствующие электрическим подъемникам, в знаменателе — ручным.

жения и может быть применен практически при любом уровне ВБ. Дополнительный датчик аварийного повышения уровня в ВБ настраивает затвор на аварийное открытие.

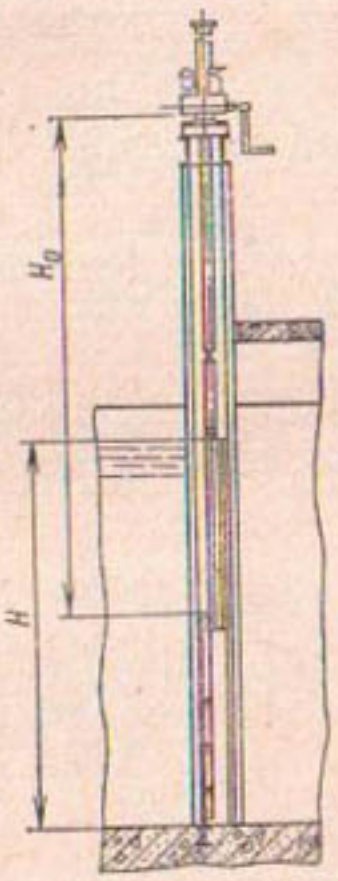
Затворы клапанные для шлюзов-регуляторов (табл. 8.6) поддерживают предельный уровень, а также регулируют уровни и расходы воды в каналах и в реках-водоприемниках осушительных и осушительно-увлажнительных систем. Рабочее положение затвора — под углом наклона 70° к горизонту.

Затворы сегментные для параболических лотков (табл. 8.7) служат для автоматического поддержания постоянного уровня воды в ВБ. При опасности возникновения волны, вызывающей раскачку затвора, необходима установка демпфера.

Затворы клапанные для лотков (табл. 8.8) предназначены для регулирования уровня и расхода воды перед водовыпусками или вододелителями. Устанавливают на параболических лотках. Подъемник ручной. Отверстие перекрывают поворотом корпуса вокруг точек подвеса на угол около 80°.

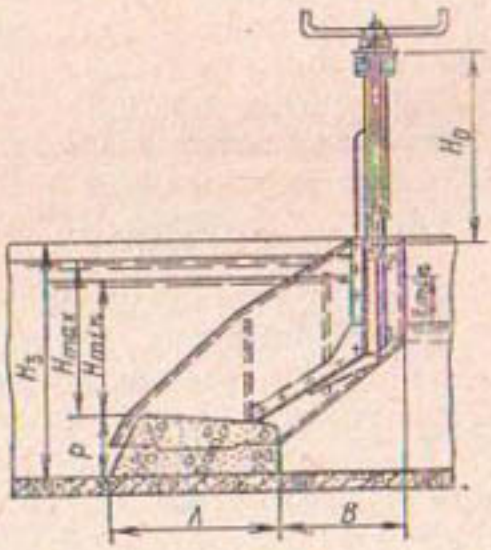
Затвор цилиндрический прямого действия (табл. 8.9) обеспечивает автоматическое поддержание постоянного уровня воды в НБ с одновременной защитой ВБ от переполнения (для сооружений открытой оросительной сети).

8.2. Технические характеристики плоских сдвоенных затворов

Шифр затвора	Схема	Размеры, мм		Марка подъемника	Масса с подъемником, кг
		$H_р$	H_0		
ПСС 1,5×2,0		3700	2480 / 2434	2,5ЭВ / 2,5В	574,2 / 538,2
ПСС 1,5×2,5		4450	3066 / 3020	5ЭВ / 5В	760,4 / 694,6
ПСС 2,0×2,5		4450	3066 / 3020	5ЭВ / 5В	871,1 / 805,1
ПСС 2,0×3,0		4650	3526 / 3480	10ЭВ / 10В	1061,4 / 988,4

Примечание. В шифре затвора указаны $B \times H$, где B — ширина перекрываемого отверстия, м; H — напор перед затвором, м; $H_р$ — высота рамы; H_0 — высота от проушины затвора (штанги) до подошвы подъемника. В числителе приведены данные, соответствующие электрическим подъемникам, в знаменателе — ручным.

8.3. Технические характеристики затворов с наклонной стенкой

Шифр автомата расхода	Схема	Напор, см		Гидравлический перепад z_{min}, см
		максимальный H_{max}	минимальный H_{min}	
ЗП-СР 0,2		40	30	13,5
ЗП-СР 0,4		64	46	19,8
ЗП-СР 0,8		100	700	28,4

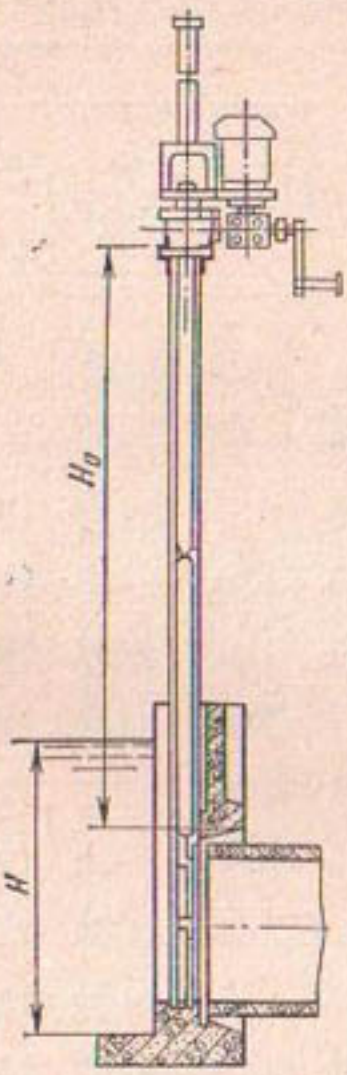
Продолжение

Шифр автомата расхода	Размеры, мм					Марка подъемника	Масса с подъемником, кг
	А	В	p	$H_з$	H_0		
ЗП-СР 0,2	350	304	120	570	535	0,5В	69,8
ЗП-СР 0,4	600	306	200	810	670	0,5В	84,8
ЗП-СР 0,8	900	551	300	1150	880	1В	136,6

Примечание. В шифре затвора указан максимальный расход, м³/с. $H_з$ — высота затвора; p — высота порога; H_0 — высота от проушины затвора до подъемника.

8.4. Технические характеристики плоских скользящих глубинных затворов

Шифр затвора	Схема	Размеры, мм		Марка подъемника	Масса с подъемником, кг
		$H_р$	H_0		
ГС 40-100		2220	1771/1715	1ЭВ/0,5В	170,2/90,5
ГС 40-100у		1825	1396/1340	1ЭВ/0,5В	162,1/85,8
ГС 60-150		2600	1956/1900	1ЭВ/0,5В	202,0/119,1
ГС 60-200		3100	2456/2400	1ЭВ/1В	219,1/157,3
ГС 70-130у		2120	1476/1420	1ЭВ/2,5В	188,8/112,5
ГС 80-150		2600	1756/1700	1ЭВ/1В	206,7/156,5
ГС 80-200		3100	2256/2200	1ЭВ/1В	224,8/172,6
ГС 80-150у		2305	1461/1405	1ЭВ/1В	208,0/145,0
ГС 100-150		2600	1558/1500	1ЭВ/1В	260,0/196,2
ГС 100-200		3100	2058/2020	2,5ЭВ/2,5В	294,7/260,0
ГС 100-250		3700	2658/2620	2,5ЭВ/2,5В	324,5/290,0
ГС 100-180у		2570	1528/1470	1ЭВ/1В	256,0/198,0
ГС 120-200		3300	2053/2015	2,5ЭВ/2,5В	353,8/314,8
ГС 120-250		3700	2453/2415	2,5ЭВ/2,5В	374,6/334,6

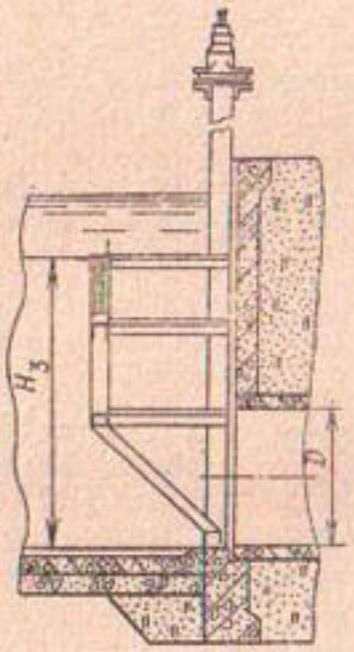


Продолжение

Шифр затвора	Схема	Размеры, мм		Марка подъемника	Масса с подъемником, кг
		$H_р$	H_0		
ГС 120-300		4200	3101 3055	5ЭВ 5В	530,7 457,7
ГС 140-250		3700	2916 2876	5ЭВ 5В	564,3 492,3
ГС 140-300		4200	2416 2376	5ЭВ 5В	595,5 524,5
ГС 160-250		3700	2716 2670	5ЭВ 5В	672,2 601,2
ГС 160-300		4200	2216 2180	5ЭВ 5В	709,4 659,4

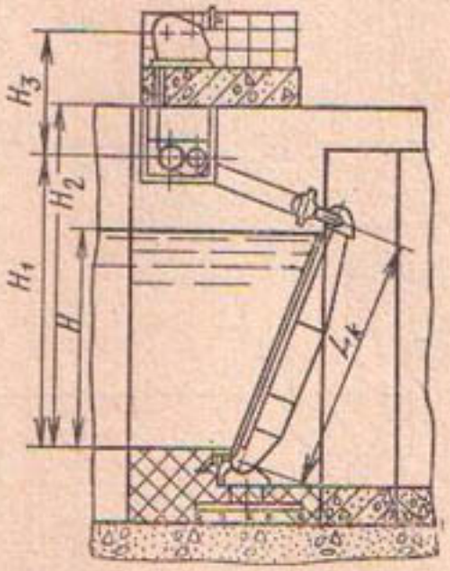
Примечание. В шифре затвора приведены $B \times H$, где H — напор на затвор, см; B — ширина перекрываемого отверстия, см; $H_р$ — высота рамы; H_0 — расстояние от проушины затвора (штанги) до подошвы подъемника. Высота затвора равна ширине перекрываемого отверстия. Числитель и знаменатель соответствуют маркам подъемника.

8.5. Технические характеристики коробчатых (ковшовых) затворов

Шифр затвора	Схема	Размеры, мм				Марка подъемника	Масса с подъемником, кг
		$L_з$	$H_з$	$H_р$	H_0		
ЗККП 1,3×0,6		736	1300	2500	1310	1В	241,2
ЗККП 1,8×0,6		736	1800	2900	1310	1В	283,3
ЗККП 2,2×0,6		736	2200	3400	1310	2,5В	361,0
ЗККП 1,3×0,8		936	1300	2400	1040	1В	232,9
ЗККП 1,8×0,8		936	1800	2900	1040	2,5В	365,4
ЗККП 1,3×1,0		1136	1300	2400	1210	2,5В	318,7
ЗККП 1,8×1,0		1136	1800	2900	1210	2,5В	419,4
ЗККП 2,2×1,0		1136	2200	2900	1210	2,5В	482,2
ЗККП 1,8×1,2		1336	1800	2900	1510	2,5В	498,0
ЗККП 2,2×1,2		1360	2200	4100	1510	2,5В	587,6
ЗККП 2,7×1,2		1360	2700	4100	1510	5В	822,2
ЗККП 2,2×1,5		1660	2200	3900	1810	2,5В	675,6
ЗККП 2,7×1,5		1560	2700	4040	1810	5В	942,2

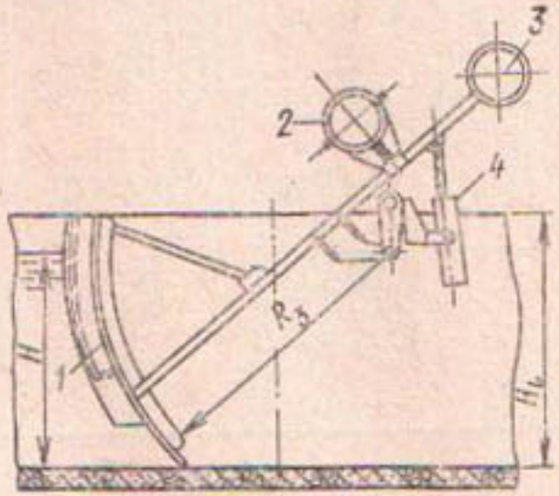
Примечание. В шифре затвора даны $H \times D$, где H — напор на затвор, м; D — диаметр перекрываемого отверстия, м.

8.6. Технические характеристики клапанных затворов для шлюзов-регуляторов

Шифр затвора	Схема	Размеры, мм					Марка подъемника и его грузоподъемность (т)	Масса с подъемником, кг
		$L_з$	$L_к$	H_1	H_2	H_3		
ЗК 8×3		8010	3340	3500	4250	1600	ЭК-78 (20)	9163
ЗК 8×2,5		8010	2940	3000	3750	1600	ЭК-70 (20)	7958
ЗК 8×2		8010	2380	2800	3250	1300	ЭК-78 (20)	7408
ЗК 5×3		5010	3340	3500	4250	1600	ЭЛ-10 (10)	5460
ЗК 5×2		5010	2940	3000	3750	1600	ЭЛ-10 (10)	5270
ЗК 5×2		5010	2380	2800	3250	1300	ЭЛ-10 (10)	5066

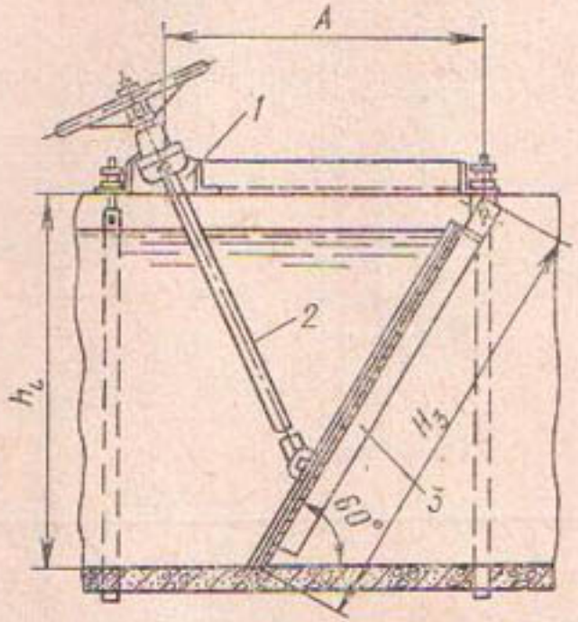
Примечание. В шифре затвора даны $B \times H$, где B — ширина перекрываемого отверстия, м; H — напор, м. Пролет затвора — $L_з$, длина клапана — $L_к$.

8.7. Технические характеристики сегментных затворов для лотков

Шифр затвора	Схема	Максимальный расход Q_{max}, м³/с	Нормативный напор H_n, см	Размеры, мм			Масса, кг
				b_L	$R_з$	$H_з$	
СПА-69-0,6		0,3	50	980	730	600	71,3
СПА-69-08		0,6	70	1132	1025	800	134,8
СПА-69-1,0		1,3	90	1674	1320	1000	351,8

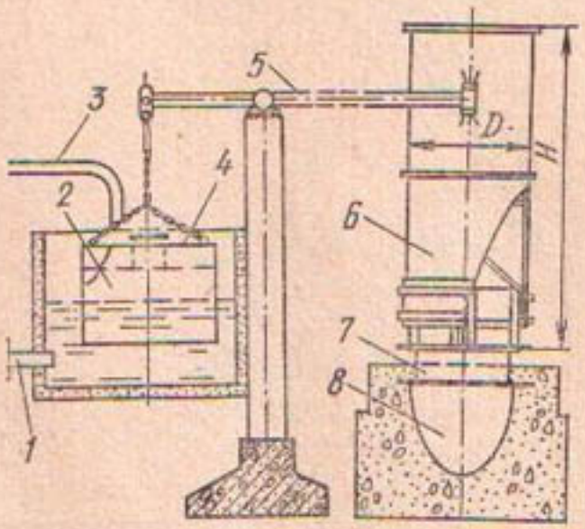
Примечание. *1* — поплавок; *2* — балансир; *3* — противовес; *4* — демпфер. b_L — ширина затвора; $H_з$ — высота затвора; H_L — глубина лотка.

8.8. Технические характеристики клапанных затворов для лотков

Шифр затвора	Схема	Размеры, мм				Масса, кг
		$H_з$	A	B	C	
40 КЛ		448	330	653	988	20,65
60 КЛ		670	495	847	1168	27,9
80 КЛ		928	670	983	1336	41,0
100 КЛ		1172	845	1500	1874	111,0

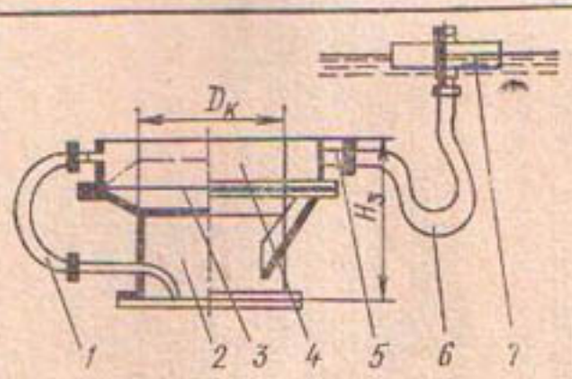
Примечание. В шифре затвора указана глубина лотка h_L, см. *1* — качающаяся опора; *2* — грузовой винт; *3* — клапан. *B* — ширина затвора поверху; *C* — ширина рамы затвора.

8.9. Технические характеристики цилиндрических затворов

Шифр затвора	Схема	Максимальный перепад z_{max}, м	Диаметр водовода D, мм	Максимальный расход затвора при открытии, м³/с			Масса, кг
				0,2D	0,25D	0,3D	
ЗЦ 0,65×2		1	600, 800	0,44	0,5	0,55	300
ЗЦ 0,65×3		2	600, 800	0,61	0,7	0,79	351
ЗЦ 0,65×4		3	600, 800	0,75	0,87	0,95	403
ЗЦ 0,8×2		1	800, 1000	0,73	0,85	0,93	402
ЗЦ 0,8×3		2	800, 1000	1,05	1,19	1,29	435
ЗЦ 0,8×4		3	800, 1000	1,26	1,45	1,58	553
ЗЦ 1×2		1	800, 1000, 1200	1,11	1,27	1,4	535
ЗЦ 1×3		2	800, 1000, 1200	1,57	1,79	1,98	678
ЗЦ 1×4		3	800, 1000, 1200	1,91	2,2	2,43	757
ЗЦ 1,25×2		1	1000, 1200, 1400	1,72	1,98	2,66	654

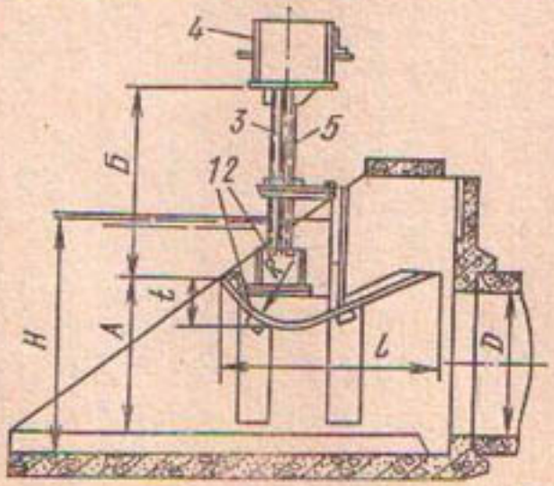
Примечание. В шифре затвора указан условный диаметр D_y (м) и высота цилиндра H, м. *1* — соединительный трубопровод; *2* — поплавок-противовес; *3* — трубопровод аварийной защиты; *4* — пригрузочная камера; *5* — коромысло; *6* — цилиндр; *7* — переход; *8* — отвод.

8.10. Технические характеристики диафрагменных затворов

Шифр затвора	Схема	Расход Q, м³/с	Размеры, мм		Гидравлический перепад z, м	Масса, кг
			$H_з$	$D_к$		
ГДН-35		0,18...0,4	460	640	0,5...2,0	120
ГДН-60		1,0...1,7	710	1075	2,0...5,0	285
ГДН-80		1,8...2,6	710	1375	2,0...5,0	485
ГДН-100		2,6...4,1	850	1600	2,0...5,0	740
РУД-1 (25)		0,03...0,11	280	480	0,2...1,5	40,5
РУД-2 (30)		0,035...0,12	346	600	0,2...1,5	58

Примечание. В шифре указан условный диаметр корпуса затвора, см; для затворов РУД $D_у$ указан в скобках. *1* — импульсная трубка; *2* — наддиафрагменная камера; *3* — гибкая диафрагма; *4* — корпус; *5* — соединительный трубопровод; *6* — сливная трубка; *7* — золотник.

8.11. Технические характеристики типовых водомерных устройств

Шифр устройства	Схема	Напор H, м	Размеры, мм					Масса, кг
			L	R	t	А	Б	
ВУ 40		1,0	600	210	150	350...500	1100...950	65,8...63,9
ВУ 60		1,3	900	200	325	450...750	1200...1000	98,1...95,0
ВУ 80		1,5	1200	415	300	700...1000	1300...1000	137,7...134,1
ВУ 100		1,8	1500	530	350	800...1200	1550...1150	224,3...185,1
ВУ 140		2,6	2100	740	500	1100...1700	2200...1600	396,8...325,0

Примечание. В шифре указан диаметр трубы сооружения D, см. *1* — криволинейная полка; *2* — поршень; *3* — трос водомерного датчика; *4* — водомерный датчик ПДС-80; *5* — защитное устройство.

Затвор регулируют и настраивают за счет изменения длины подвески. Максимальная конструктивно допускаемая величина открытия — 0,3 диаметра отверстия выходного патрубка.

Затворы диафрагменные низконапорные (табл. 8.10) предназначены для оборудования перегораживающих и водовыпускных сооружений на каналах оросительных и осушительно-увлажнительных систем с каскадным регулированием, для оборудования водовыпусков в оросители для дождевальной машины «Кубань» и для рисовых чеков. Автоматически поддерживают постоянный уровень воды в каналах с регулированием по НБ и понижением уровня воды на 3...4 см от расчетного при пропуске максимальных расходов.

Водомерное устройство для трубчатых регуляторов (табл. 8.11) служит для учета расхода воды на трубчатых сооружениях открытой оросительной сети с диаметрами труб 40...140 см. Устанавливают в унифицированный объемный оголовок с ныряющими стенками перед плоским затвором. Действие водомерного устройства основано на создании перепада пьезометрических напоров за счет местного сжатия потока криволинейной полкой. Перепад передается на регистрирующий прибор: ДРВ из системы «Ташкент-2», ПДС-80 с дополнительным счетчиком расхода воды или емкостный прибор на базе «Рус».

8.5. АРМАТУРА ТРУБОПРОВОДНЫХ СИСТЕМ ОРОШЕНИЯ

Арматура трубопроводных систем орошения включает устройства, устанавливаемые на трубопроводах, НС или емкостях, обеспечивающих требуемую подачу воды, в том числе с минеральными и органическими удобрениями, к дождевальным машинам и установкам. Классификация ее по функциональному назначению дана в таблице 8.12.

Запорная арматура. Наиболее прогрессивным видом ее являются *дисковые поворотные затворы* (рис. 8.9, табл. 8.13...8.15) с герметичностью III класса. Предназначены для установки в качестве запорного и дросселирующего устройства на трубопроводах систем мелиорации, водоснабжения, орошения сточными водами, не содержащими волокнистых включений, на других гидротехнических сооружениях.

Затворы с дистанционным управлением устанавливают на трубопроводах в грунте без устройства колодца или на НС для управления с верхних этажей. Поворотный затвор с программированным гидроприводом предназначен для аварийной защиты дождевальных машин. Для исключения гидравлических ударов в сети гидропривод затворов имеет дросселирующее устройство, обеспечивающее закрытие в соответствии с изменением коэффициента сопротивления. Минимальное давление, необходимое для управления затвором, — 0,3 МПа. График закрытия затвора приведен на рисунке 8.10.

Затворы с уплотнением по диску используют в качестве запорных устройств на трубопроводах с рабочей температурой воды до 80 °С с электроприводом 32с908р, 100 °С — с электроприводом ИА 99044.

Для предотвращения обратного потока воды используют *обратные клапаны* (табл. 8.16). Обратные клапаны с регулируемым закрытием служат для безударного отключения трубопроводов при возникновении обратного потока воды и для установки на автоматизированных НС, предусматривающих пуск и остановку агрегатов на открытый запорный орган. Безударное отключение трубопроводов обеспечивается замедленным закрытием клапанов в последние 20...40° поворота (рис. 8.11): поворот на 60° от полного открытия производят за 0,2...0,4 с, на следующие 20...30 °С — за 10...25 с и на последние 10° до полного закрытия — за 4...20 с. Для клапанов с $D_u > 300$ м время закрытия соответственно равно 0,5...1 с; 10...50 с; 4...20 с. Максимально допустимый перепад давления на диске клапана при демпфировании составляет 1,2 МПа. Минимальное давление, гарантирующее герметичное закрытие клапана, — 0,05 МПа. Коэффициент сопротивления, приведенный к площади проходного сечения в положении полного открытия клапана, равен: для $D_y =$ =50 мм — 9,2; 80—6,5; 100 — 5,5 и для $D_y = 150$ мм — 4.

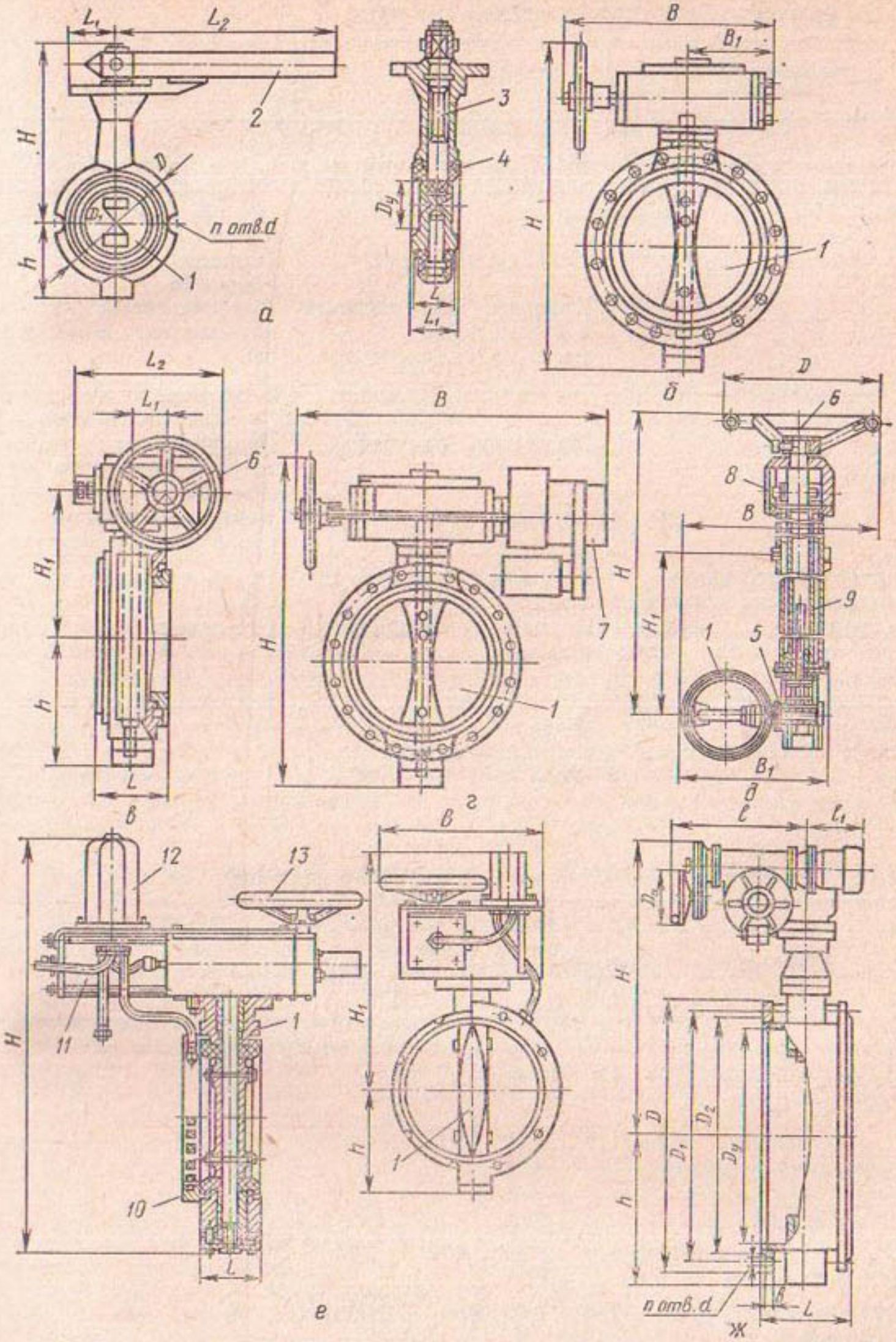


Рис. 8.9. Дисковые поворотные затворы:

а — с уплотнением по корпусу и с рукояткой; *б* — то же с рычажно-винтовым редуктором; *в* — то же с червячным редуктором; *г* — то же с электроприводом; *д* — с дистанционным управлением; *е* — с программированным гидроприводом; *ж* — с уплотнением по диску и электроприводом; *1* — диск; *2* — рукоятка с защелкой; *3* — вал; *4* — резиновая уплотнительная муфта; *5* — редуктор; *6* — маховик; *7* — электропривод; *8* — колонка управления; *9* — соединительная штанга; *10* — фильтр; *11* — гидравлический привод; *12* — управляющий орган; *13* — механизм ручного управления

8.12. Классификация трубопроводной арматуры

Вид арматуры и ее функции	Тип	Наименование
Запорная — перекрывает водный поток в трубопроводе	Затворы дисковые поворотные	С ручным приводом, с гидроприводом, с электроприводом; низконапорные для сточных вод
	Клапаны обратные	Однодисковые, демпфированные
	Клапаны многоцелевые и специальные	Водокольцевые, комбинированные, многоцелевые
Регулирующая — регулирует параметры потока	Регуляторы давления	Универсальные, регулирующие «после себя»
	Регуляторы расхода	Редукционные стабилизаторы; объемного ограничения
	Аэраторы	Вантузы; клапаны впуска и выпуска воздуха
Предохранительная — автоматически защищает оборудование системы при аварийных ситуациях	Клапаны противоударные	Стационарные; позиционные
	Клапаны предохранительные	Стационарные
Соединительная — соединяет трубы и оборудование оросительной сети	Компенсаторы.	Компенсаторы длины
	Фитинги	Муфты и соединительные части
	Фланцы	Гидротехнические

8.13. Технические данные дисковых поворотных затворов

Управление	Условное давление, МПа	Условный диаметр, мм	Усилие на штурвале, Н	Время полного открытия и закрытия, мин	Установочное положение
С уплотнением по корпусу					
Ручное, с рукояткой (см. рис. 8.9, *а*)	1,0	50, 80	—	—	Любое
От червячного или рычажно-винтового редуктора (см. рис. 8.9, *б*, *в*)	1,0	100, 150, 200	80	2...3	»
От электропривода (см. рис. 8.9, *г*)	1,0	300, 400	80	2...3	»
От рычажно-винтового привода	1,6	100, 150, 200, 300	150	2...3	»
Дистанционное от рычажно-винтового редуктора (см. рис. 8.9, *д*)	1,6	150, 200, 300	640	2...3	С вертикальным положением телескопического привода

Продолжение

Управление	Условное давление, МПа	Условный диаметр, мм	Усилие на штурвале, Н	Время полного открытия и закрытия, мин	Установочное положение
Программированное от гидропривода (см. рис. 8.9, *е*)	1,2	150, 200, 300	—	При P_y= =0,3 МПа— 2...3; при P_y= =1,2 МПа — 1...1,5	Вертикальное
С уплотнением по диску					
От электропривода ИА 99044	1,0	300, 400, 600, 800, 1000, 1200	—	0,5...2,3	На горизонтальном трубопроводе электроприводом вверх
От электропривода 32с908р (см. рис. 8.9, *ж*)		1400, 1600	—	0,5...2,3	То же

Обратные бесфланцевые клапаны с односторонней подвеской диска устанавливают на вспомогательном насосном оборудовании.

Регулирующая арматура (рис. 8.12). Для автоматического поддержания заданного давления в трубопроводе служат *регуляторы давления и расхода* воды. Применяют их на трубопроводах как регулирующее и запорное устройство, а также для аварийной защиты дождевальных машин (табл. 8.17).

Регулятор давления на базе поворотного затвора с гидроприводом поддерживает заданное давление «после себя» или «до себя». Работает в режиме регулирующего и запорного органа. Время закрытия 60...120 с при D_y= =150 мм, 80...130 с при D_y=200 мм и 90...150 с при D_y=300 мм.

Регулятор давления РД поддерживает заданное давление «после себя», работает только в режиме регулирующего органа. Регулятор давления РДУ автоматически поддерживает заданное давление «после себя» или «до себя», применяют как регулирующее и запорное устройство.

Аэрационная арматура (см. рис. 8.12) представляет собой противовакуумные клапаны для впуска и выпуска воздуха КВВВ, для впуска и защемления воздуха КВЗВ, для срыва вакуума; вантузы (табл. 8.18).

Клапан для впуска и выпуска воздуха КВВВ используют для впуска воздуха при плановом или аварийном опорожнении трубопроводов и для выпуска его при заполнении водовода. Клапан открывается под действием разности давлений между атмосферой и внутренней полостью трубопровода, впуская воздух и обеспечивая срыв вакуума в водоводе. Зависимость потерь напора в КВВВ от скорости движения воздуха дана на рисунке 8.13, *а*. Условное давление в клапане — 1,6 МПа, герметичность обеспечена при давлении 0,005 МПа. Коэффициент гидравлического сопротивления клапана при впуске воздуха — 0,208, при выпуске — 0,187.

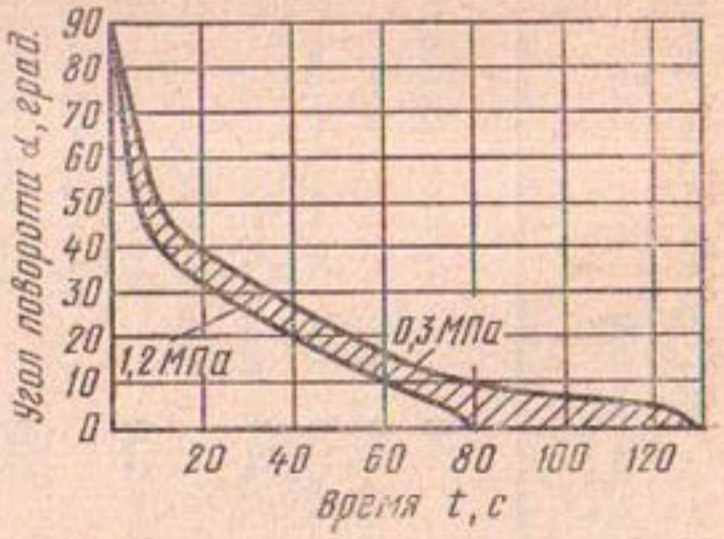


Рис. 8.10. График закрытия затвора D_y=200 мм.

8.14. Технические характеристики дисковых поворотных затворов с уплотнением по корпусу

Условный диаметр D_y, мм	Управление	Размеры, мм								Масса, кг
		$D(D_1)$	$B(B_1)$	L	L_1	L_2	H	H_1	h	
50	Ручное, рукояткой	107(100)	—	32	34	170	143	—	66	2,3
80	То же	142(135)	—	32	34	170	158	—	70	3
100	От червячного редуктора	200	325	52	84	284	423	195	98	24
150	То же	200	325	62	84	284	481	232	148	30
	От рычажно-винтового редуктора	200	388	62	80	250	513	264	148	47,5
200	От червячного редуктора	200	335	90	80	260	580	255	225	40,9
	От рычажно-винтового редуктора	200	388	90	80	250	620	295	225	57
300	От червячного редуктора	400	600	100	188	673	860	365	295	121
	От рычажно-винтового редуктора	320	585	100	100	372	830	375	295	158
	От электропривода	320	930	100	100	372	830	375	295	295
400	От червячного редуктора	400	600	100	188	673	990	430	360	130
	От рычажно-винтового редуктора	320	585	100	100	372	960	440	360	167
	От электропривода	320	930	100	100	372	960	440	360	185
100	От рычажно-винтового привода	180	—	52	45	$\frac{190}{190}$	$\frac{360}{354}$	$\frac{150}{150}$	$\frac{120}{114}$	$\frac{18}{10}$
150	То же	200	—	62	50	$\frac{230}{227}$	$\frac{473}{440}$	$\frac{190}{184}$	$\frac{183}{156}$	$\frac{27}{12}$
200	»	220	—	95	60	$\frac{276}{276}$	$\frac{590}{550}$	$\frac{179}{248}$	$\frac{201}{192}$	$\frac{44,7}{28,2}$
300	»	250	—	100	90	$\frac{372}{370}$	$\frac{810}{700}$	$\frac{431}{331}$	$\frac{254}{244}$	$\frac{86,3}{63,5}$

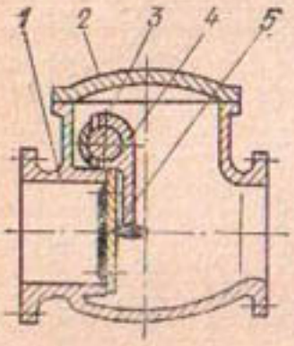
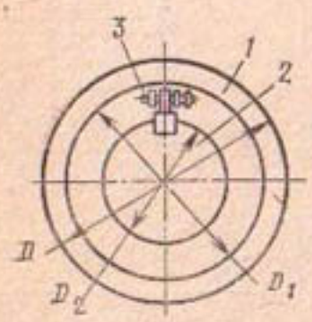
150	С дистанционным управлением	200	475(420)	62	130	—	1800	1000	—	61
200	То же	280	580(490)	90	145	—	1800	1000	—	85
300	»	360	760(670)	100	205	—	1800	1000	—	123
150	С программированным гидроприводом	—	149(730)	62	280	—	450	240	—	48
200	То же	—	225(730)	90	335	—	690	260	—	64
300	С программированным гидроприводом	—	295(930)	100	420	—	730	360	—	124

Примечание. В числителе данные для литого исполнения затвора, в знаменателе — сварного.

8.15. Технические характеристики поворотных затворов с уплотнением по диску

Условный диаметр D_y, мм	Размеры, мм														Масса, кг	Электродвигатель		Время открытия или закрытия затвора
	$L(L_1)$	D	D_1	D_2	b	d	$\sim H$	h	l	l_1	l_2	l_3	D_0	h_0		тип	мощность, кВт	
							С электроприводом ИА 99044											
600	300	780	725	685	31	30	815	390	—	730	465	—	240	40	44,5	ВАОА-071-4	0,4	0,5
800	350	1010	950	905	33	33	883	505	—	860	590	—	240	48	95	АОС41-4Ф2	1,7	0,9
1000	400	1220	1160	1100	40	40	1023	610	—	860	590	—	240	56	134	АОС42-4Ф2	2,8	0,8
1200	450	1455	1380	1325	45	45	1073	730	—	950	650	—	240	64	204	АОС42-4Ф2	2,8	1,2
							С электроприводом 32с 908р											
1400	500 (840)	1675	1590	1525	50	46	2015	905	664	296	425	1225	400	36	379	АОС2-41-4	5,2	1,3
1600	675 (1230)	1915	1820	1750	60	52	2100	950	664	296	425	1225	400	40	499	АОС2-42-4	7,5	1,3

8.16. Технические характеристики обратных клапанов

Схема	Условный диаметр D_y, мм	Размеры, мм						Масса, кг
		L	H	B	D	D_1	D_2	
Поворотные с регулируемым закрытием								
	200	500	497	525	—	—	—	114
	250	600	590	590	—	—	—	268
	300	230	460	640	—	—	—	155
Бесфланцевые с односторонней подвеской								
	50	24	—	—	100	66	32	1,5
	80	24	—	—	135	93	54	2,1
	100	31	—	—	155	115	70	3,2
	150	33	—	—	205	150	114	4,2

Примечание. *1* — корпус; *2* — крышка; *3* — вал; *4* — рычаг; *5* — диск; *L*, *H*, *B* — длина, высота и ширина клапана.

8.17. Технические характеристики регуляторов давления

Марка регулятора	Условный диаметр, D_y, мм	Условное давление P_y, МПа	Диапазон регулирования, ΔP, МПа	Минимальное давление, при котором работает регулятор, МПа	Точность регулирования, %	Коэффициент гидравлического сопротивления в положении «Открыто»	Размеры, мм			Масса, кг
							L	B	H	
На базе поворотного затвора с гидроприводом	150	1,2	0,3...1,1	0,03	±5	0,4	62	810	550	59,3
	200					0,36	90	830	655	78,2
	300					0,27	100	1030	830	124
РД	150	1,6	0,4...1,2	0,4	10	13	436	490	465	94
	200						548	565	570	133
РДУ	150	1,6	0,01...1,0				450	402	520	110
	200	1,0...1,6	0,1...1,2	0,1	5	13	600	510	570	150

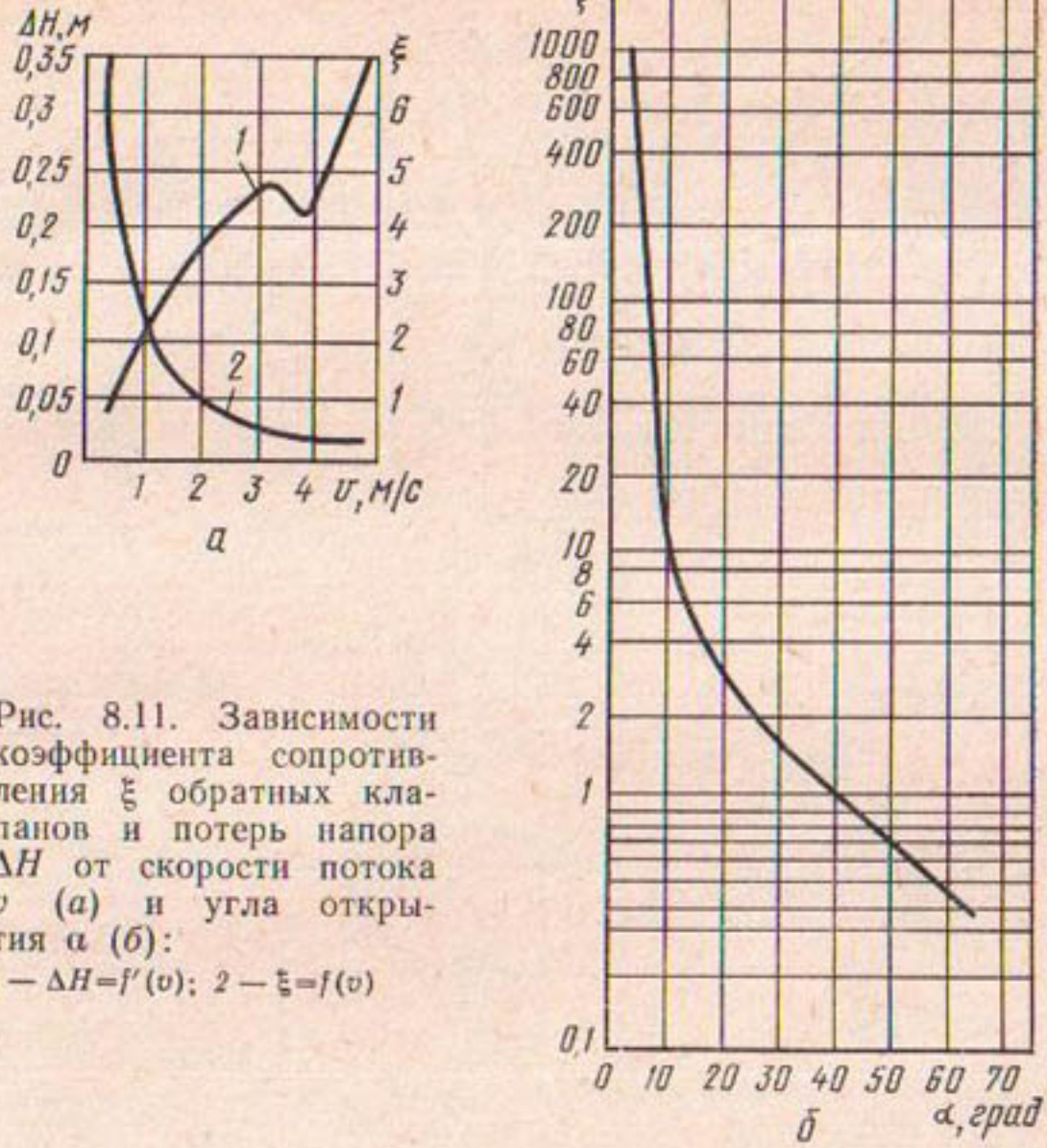


Рис. 8.11. Зависимости коэффициента сопротивления ξ обратных клапанов и потерь напора ΔH от скорости потока v (*а*) и угла открытия α (*б*):
1 — $\Delta H=f'(v)$; *2* — $\xi=f(v)$

Клапан для впуска и защемления воздуха КВЗВ предназначен для предотвращения гидравлических ударов, защиты тонкостенных труб от деформации в момент возникновения вакуума при переходных режимах, впуска воздуха при опорожнении водоводов или отдельных ремонтируемых их участков. Значение вакуума, необходимое для открытия клапана, составляет 1... 1,5 МПа; пропускная способность в сверхкритическом режиме движения воздуха для D_y=50 мм — 0,045 м³/с, 150 мм — 0,04 м³/с. Зависимость потерь напора от скорости впуска воздуха показана на рисунке 8.13, *б*. Коэффициент гидравлического сопротивления при открытии тарели клапана — 0,5.

Клапан срыва вакуума применяют на трубопроводах закрытых оросительных систем для предотвращения гидроудара. Устанавливают на тупиковых и повышенных участках вертикально, крышкой вверх. Настройки не требует, так как работает в автоматическом режиме. Время срабатывания — 1 с, расход воды через клапан для D_y=100 мм — 0,044 м³/с, 150 — 0,054 и 200 мм — 0,1 м³/с.

Вантуз рычажный В используют для периодического удаления воздуха из трубопроводов в эксплуатационном режиме работы водоводов. Зависимость производительности вантуза В от давления дана на рисунке 8.14.

Мембранный вантуз с увеличенным расходом выброса воды типа ВМ предназначен для автоматического удаления воздуха из трубопроводов в период его заполнения и эксплуатации, а также для автоматического впуска воздуха в трубопровод при образовании вакуума. Открывается при значении вакуума не более 10 КПа. Расход воздуха для ВМ 50Л — 0,2 м³/с, для ВМ 100Л — 0,8 м³/с.

Предохранительная арматура и устройства (рис. 8.15, табл. 8.19). Предназначены для защиты трубопроводов оросительной сети от гидравлических ударов при отключении дождевальных машин, переключениях на НС, закры-

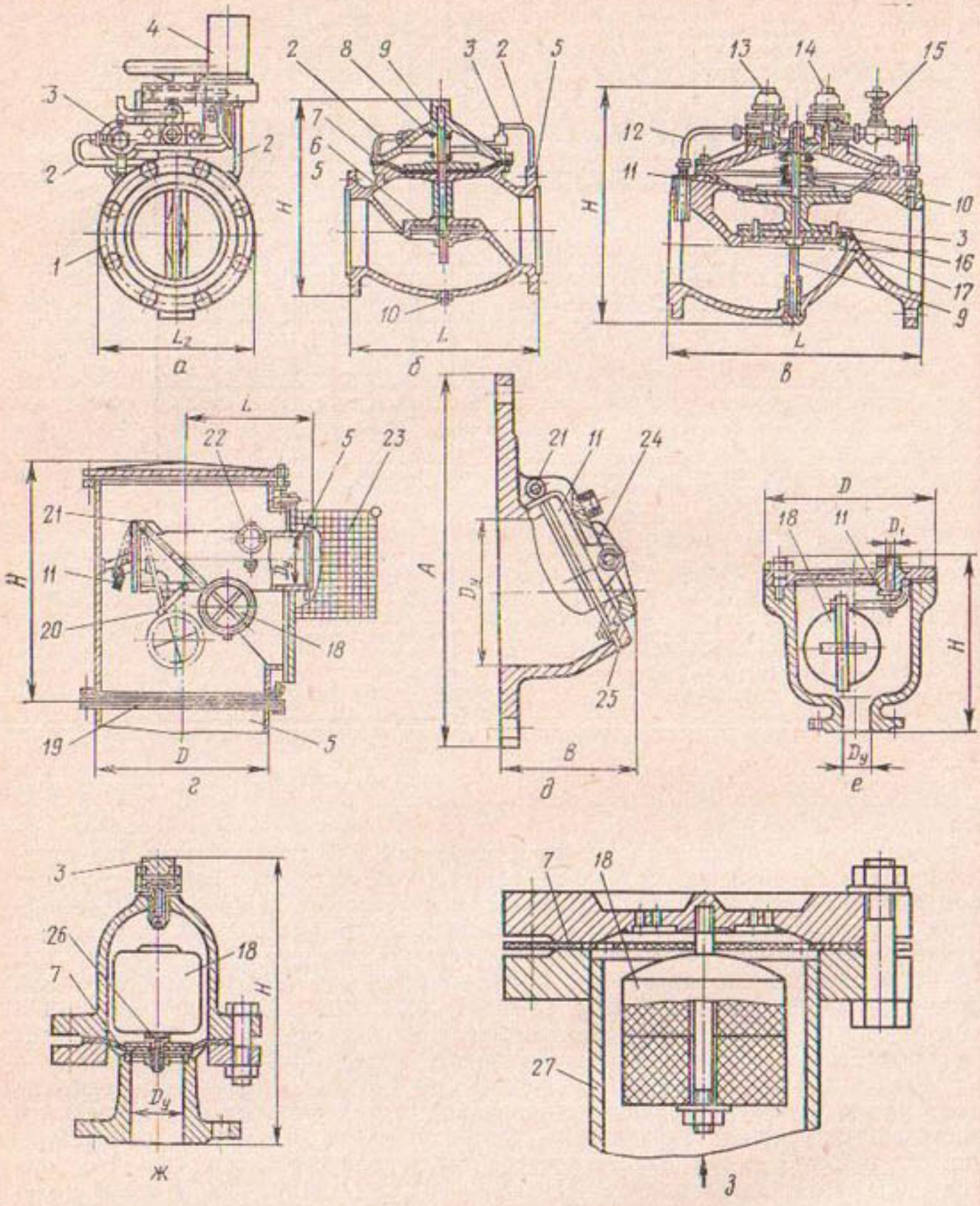


Рис. 8.12. Регулирующая арматура:

а — регулятор давления на базе поворотного затвора с гидроприводом; *б, в* — регуляторы давления РД и РДУ; *г* — КВВВ; *д* — КВЗВ; *е* — вантуз рычажный; *ж* — вантуз мембранный; *з* — клапан срыва вакуума; *1* — затвор с гидроприводом; *2* — соединительные трубки; *3* — клапан; *4* — управляющий орган; *5* — патрубок; *6* — запорный орган; *7* — мембрана; *8* — пружина; *9* — шток; *10* — сливная пробка; *11* — тарель; *12* — импульсная трубка; *13* — ускоритель; *14* — датчик; *15* — вентиль; *16* — резиновое уплотнение; *17* — седло; *18* — поплавок; *19* — рассекатель; *20* — ограничитель; *21* — ось подвески; *22* — вантуз рычажный; *23* — сетчатое ограждение; *24* — рычаг; *25* — уплотнение; *26* — дроссель; *27* — трубопровод

8.18. Технические характеристики аэрационной арматуры

Наименование аэраторов	Условный диаметр D_y, мм	Размеры, мм			Масса, кг
		$D(D_1)$	$L(B)$	H	
Клапан для впуска и выпуска воздуха КВВВ	100	400	456	570	200
	150	500	575	767	274
Клапан противовакуумный для впуска и защемления КВЗВ	50	100	70	155	7
	180	250	150	380	22
Вантуз рычажный:					
В 6	50	275 (6)	—	295	30
Вс 8	50	275 (6)	—	280	24,2
В 8	50	320 (8)	—	295	41
Вантуз мембранного типа ВМ:					
ВМ 50Л	50	195	—	276	15
ВМ 100Л	100	215	—	310	31
Клапан срыва вакуума	100	215	—	175	8,35
	150	280	—	182	13,35
	200	335	—	180	16,92

8.19. Технические характеристики предохранительной арматуры

Наименование	Условный диаметр, D_y, мм	Условное давление, P_y, МПа	Диапазон давления ΔP, МПа	Точность регулирования, %	Размеры, мм			Время закрытия, с	Масса, кг
					L	B	H		
ПСУ-100	100	1,4	0,4...1,2	10	450	290	1300	20...50	23
ПЗГ-120	100	1,4	0,6...1,2	5...10	490	310	880	0,5...0,6	27,3

ли затворов. Устанавливают на трубопроводах оросительной сети и сбросных линиях НС.

Предохранительно-сбросное устройство ПСУ-100 комплектуется дальнеструйным дождевальным аппаратом, закрепляемым на патрубке на высоте не

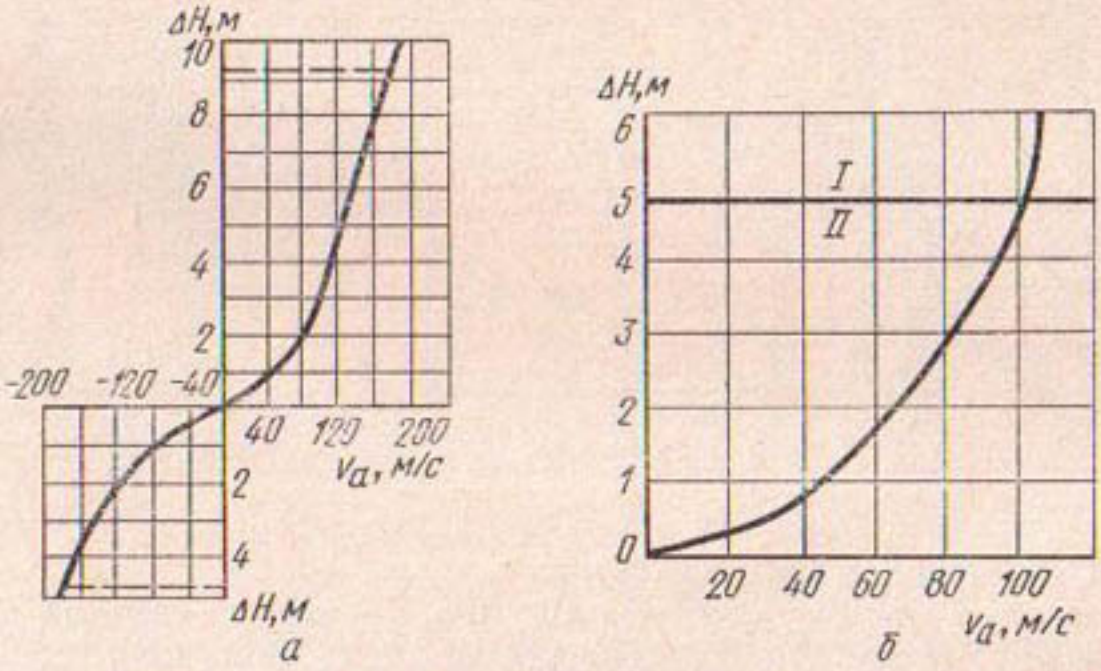


Рис. 8.13. Зависимость потерь напора ΔH от скорости движения воздуха v_a, определенной при атмосферном давлении, и $t = 15$ °С:

а — для КВВВ; *б* — для КВЗВ; *I* — сверхкритический режим; *II* — докритический режим

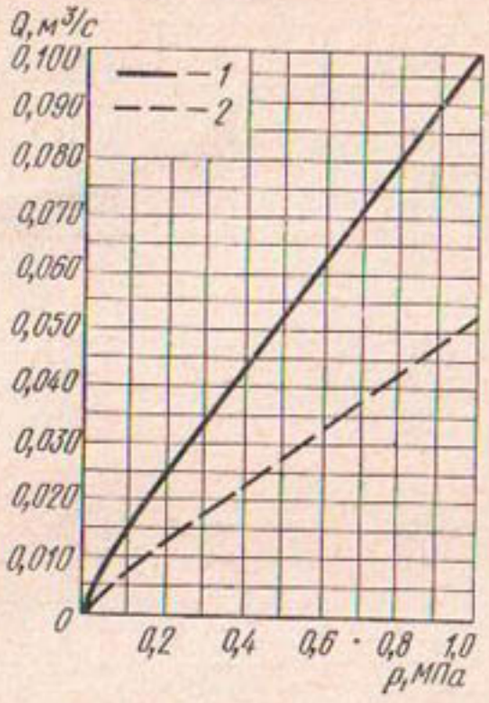


Рис. 8.14. Зависимость производительности вантузов (расхода Q) от давления p:
1 — вантуз В8; *2* — вантуз В6

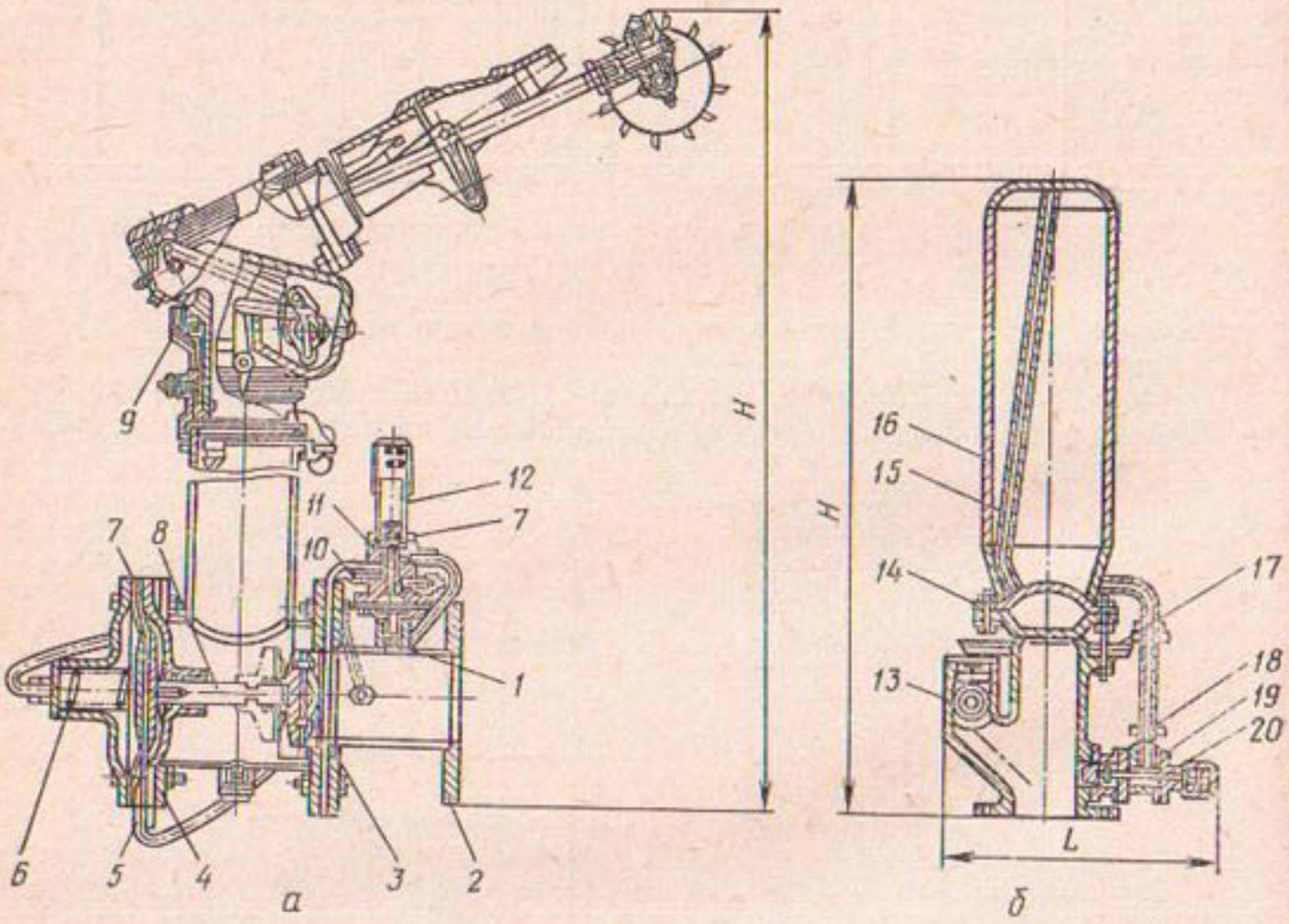


Рис. 8.15. Предохранительная арматура:
а — предохранительно-сбросное устройство ПСУ-100; *б* — клапан защитный гидравлический КЗГ-120; *1* — управляющий клапан; *2* — входной патрубок; *3* — запорный диск; *4* — мембранный механизм; *5* — выходной патрубок; *6* — пружина; *7* — мембрана; *8* — шток; *9* — дождевальный аппарат; *10* — корпус управляющего клапана; *11* — плунжер; *12* — регулировочная пружина; *13* — вантуз; *14* — гибкая диафрагма; *15* — трубка; *16* — водовоздушный бак; *17* — отражательная тарель; *18* — отсечное устройство; *19* — отсечный клапан; *20* — поршень

более 0,6 м от земли. При использовании на НС насосов с крутой характеристикой необходимо комплектовать ПСУ-100 регулятором давления «до себя» на обводной линии или применять автоматику по расходу. Управление — гидравлическое. Расходно-напорные характеристики ПСУ-100 приведены на рисунке 8.16. Радиус разбрызгивания дождя — 55...60 м, интенсивность — 0,114...0,117 мм/мин.

Клапан защитный гидравлический КЗГ-120 используют на оросительной системе с дождевальными машинами «Фрегат». Снимает избыточное давление при гидроударе в трубопроводе кратковременным выбросом воды из него. При плавном повышении напора в сети автоматически переключается на режим работы предохранительного клапана. Радиус разбрызгивания дождя 15...20 м, слой осадков за один выброс при зарядке клапана — 1,6 мм, при гидроударе — 0,6 мм; объем воды при выбросе — до 0,26 и 0,33 м³ соответственно.

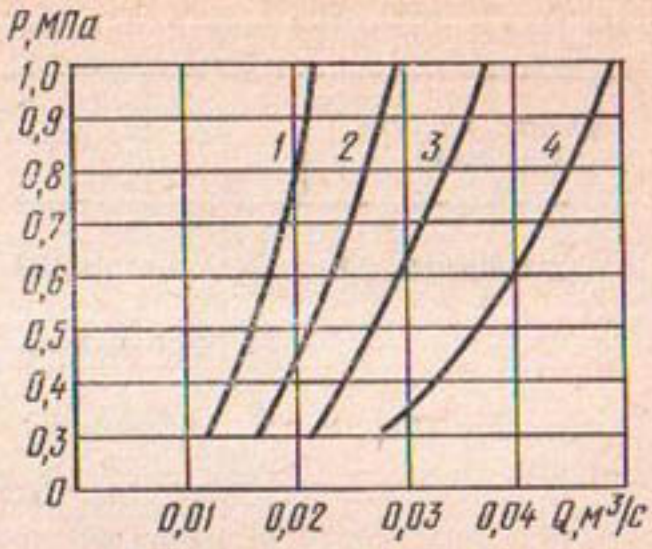
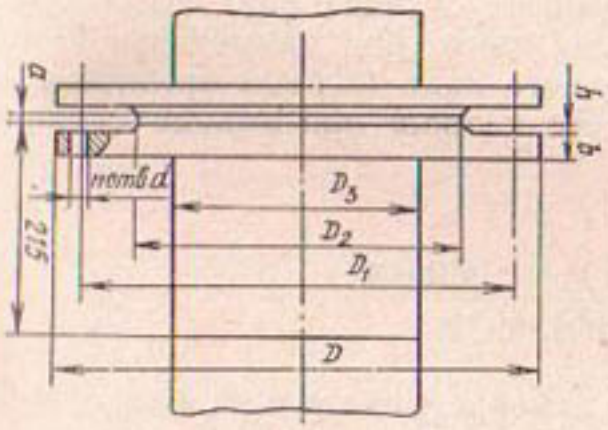


Рис. 8.16. Расходно-напорные характеристики ПСУ-100:
1 — *d*=25 мм; *2* — 30 мм; *3* — 34 мм; *4* — 40 мм (*d* — диаметр выходного патрубка)

Соединительная монтажная арматура. Фланцы гидротехнические чугунные со стальными патрубками (табл. 8.20) предназначены для монтажа трубопроводов и трубопроводной арматуры на закрытых оросительных сетях (вначале соединяют фланцы, а затем приваривают патрубки к трубопроводу). Для удобства монтажа и демонтажа запорной арматуры на трубопроводах применяют монтажные проставки.

8.20. Технические характеристики гидротехнических фланцев

Схема	Условное давление P_y, МПа	Условный диаметр D_y, мм	Размеры, мм									Масса, кг
			D	D_1	D_2	D_3	d	n	h	a	b	
	1	80	195	160	133	89	18	4	3	3	13	4,89
		100	215	180	158	108	18	8	3	3	13	5,92
		150	280	240	212	159	22	8	3	4	15	10,14
		200	335	295	268	219	22	8	3	4	19	15,74
		300	440	400	370	325	22	12	4	4	23	26,9
	1,6	80	195	160	133	89	18	4	3	3	15	5,25
		100	215	180	158	108	18	8	3	3	17	6,65
		150	280	240	212	159	22	8	3	4	19	11,39
		200	335	295	268	219	22	12	3	4	23	17,03
		300	460	410	370	325	26	12	4	4	28	32,46

8.6. ПОДЪЕМНО-ТРАНСПОРТНЫЕ УСТРОЙСТВА СООРУЖЕНИЙ

Классификация механизмов и устройств. Подъемно-транспортные механизмы и устройства предназначены для монтажа и демонтажа затворного и насосного оборудования, технологических операций при эксплуатации и ремонтных работах. Классификация их дана в таблице 8.21.

8.21. **Классификация подъемно-транспортных устройств**

Признак классификации	Тип устройства	Характеристика
По условиям работы	Стационарный	Один механизм обслуживает один затвор или насос
	Передвижной	Один механизм на несколько затворов или насосов
По способу присоединения	С гибкой подвеской	Лебедки, краны, тельферы применяют при опускании затворов без дожимных усилий
	С жесткой тягой	Механические и гидравлические подъемники. Можно использовать в любых случаях
По типу подъема и перемещения груза	Электрифицированный	При подъеме монтажной единицы на высоту более 6 м или перемещении ее на 18 м и более. При обслуживании четырех и более насосов
	Ручной	При обслуживании менее четырех насосов, подъеме монтажной единицы до 6 м, перемещении ее на расстояние до 18 м

Стационарные механизмы применяют при необходимости очень быстрого маневрирования затворами — на реках с быстро нарастающими паводковыми расходами, в судоходных сооружениях и т. д., обеспечения полной автоматизации или телеуправления работой оборудования, маневрирования затвором силами одного человека (например, на регуляторах каналов оросительных систем и на водосбросах малых плотин), на НС, при малом числе затворов на сооружении, когда устройство передвижного механизма неэкономично.

Передвижные механизмы — краны (подвесные, козловые, реже мостовые) и тельферы (монорельсовые тележки) применяют, когда на сооружении много однотипных затворов или насосов и нет необходимости в их быстром и одновременном маневрировании, если на сооружении предусмотрены аварийные или ремонтные затворы, переставляемые из одного отверстия в другое.

Особенности работы механизмов и устройств на гидросооружениях: небольшие скорости перемещения затворов (не более 0,2...1 м/мин, а при ручном приводе 0,01...0,05 м/мин), наличие во многих случаях двух точек подвеса затвора с обязательной синхронизацией их движения; применение автоматических ограничителей перегрузки и свободного хода тяговых органов при заклинивании или зависании затворов при упоре в порог или выходе затвора из отверстия.

8.6.1. КОНСТРУКЦИИ И УСЛОВИЯ ПРИМЕНЕНИЯ МЕХАНИЗМОВ

Лебедки осуществляют поступательное движение каната или пластинчатой цепи, передаваемое через систему подвесок затвору. Устанавливают их над перекрываемыми отверстиями на железобетонных или стальных конструкциях, называемых служебными мостами, или на быках сооружения. Лебедки выполняют на грузоподъемность до 250...300 т. Для подвески затвора используют полиспасты.

Тельферы (монорельсовые тележки, рис. 8.17, *а*) применяют на небольших сооружениях для управления ремонтными затворами, транспортировки насосов, затворов и решеток, реже для маневрирования основными затворами за одну точку подвеса. Выпускают серийно на грузоподъемность 1, 3, 5 и 10 т с дистанционным ручным управлением подъемом и передвижением.

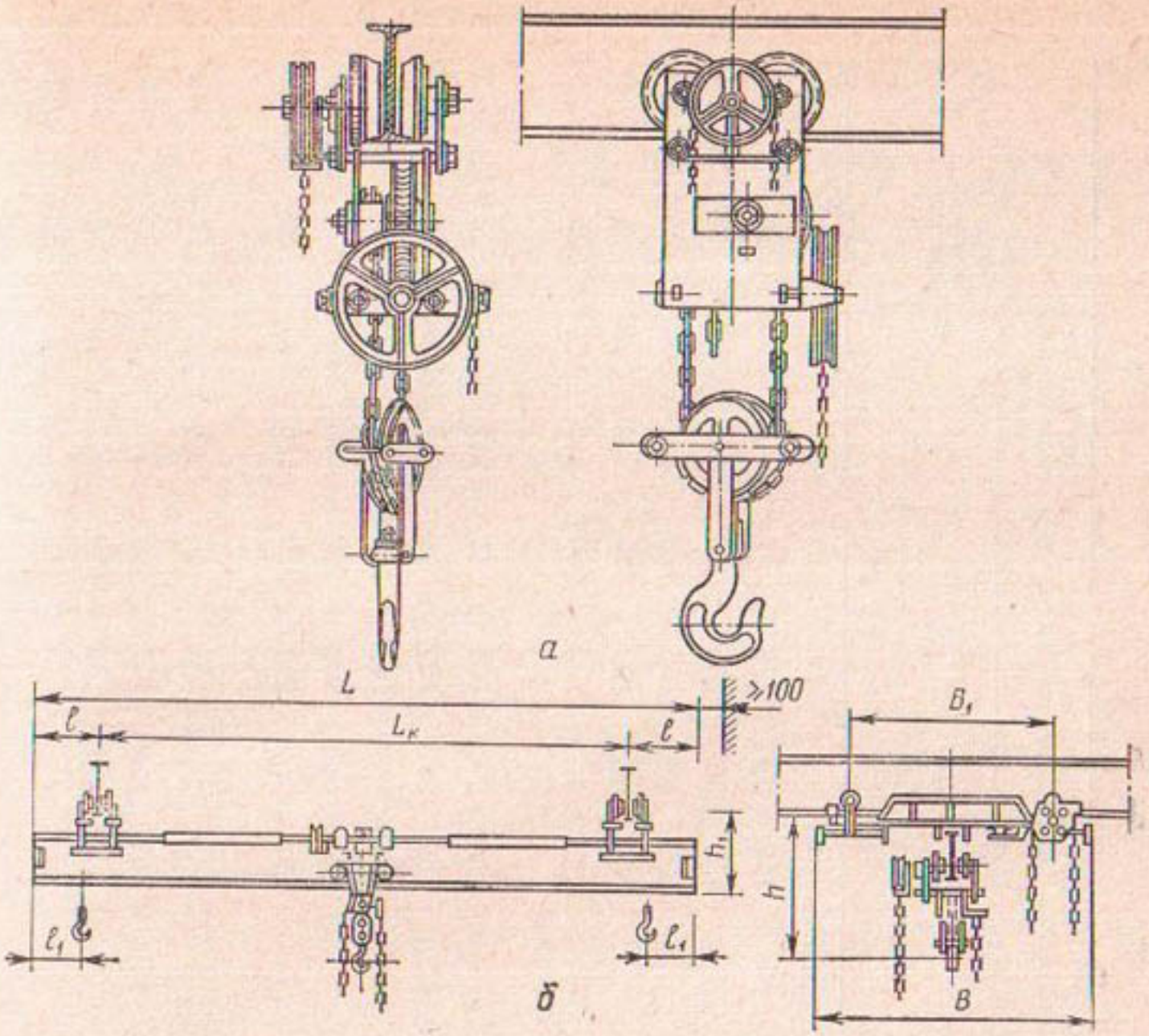


Рис. 8.17. Подъемно-транспортные устройства с гибкой подвеской:
а — тельфер; *б* — подвесной кран (кран-балка); *в* — подвесной электрический кран; *г* — мостовой кран

8.22. **Технические характеристики подвесных ручных кранов**

Длина крана L, м	Грузоподъемность, т	Пролет $L_к$, м	Размеры, мм						Тяговое усилие, Н			Скорость передвижения, м/мин		Номер двутавра для подкранового пути	Масса, кг
			l	B_1	h	h_1	B	l_1	подъема груза	передвижения		тали	крана		
										тали	крана				
3,6	0,5	3,0	300	1000 для	590	220	1300 для	150	300	100	60	9,2	2,9	18	274
	1,0			L=3,6... 5,7 м	590	220	L=3,6...5,7 м	150	300	100	60	9,2	2,9	18	274
	2,0				890	280		200	600	150	150	5,3	3,6	24	460
	3,2				950	280		200	600	150	150	5,3	3,6	24	469
	5,0				1095	340		220	750	200	200	5,5	3,6	30	633
6,6	0,5	6,0	300	1500 для	590	220	1800 для	150	300	100	60	9,2	2,9	18	372
	1,0			L=6,6... 9,3 м	590	220	L=6,6... 9,3 м	150	300	100	60	9,2	2,9	18	372
	2,0				950	340		200	600	150	150	5,3	3,6	30	663
	3,2				950	340		200	600	150	150	5,3	3,6	30	679
	5,0				1155	400		220	750	200	200	5,5	3,6	36	889
10,2	0,5	9,0	600	1800 для	650	280	2100 для	150	300	100	60	9,2	2,9	24	562
	1,0			L=10,2... 11,4 м	650	280	L=10,2... 11,4 м	150	300	100	60	9,2	2,9	24	562
	2,0				1010	400		200	600	150	150	5,3	3,6	36	940
	3,2				1010	400		200	600	150	150	5,3	3,6	36	961
	5,0				1245	490		220	750	200	200	5,5	3,6	45	1271

8.23. Технические характеристики подвесных кранов с электроприводом

Длина крана L, м	Грузоподъемность, т	Пролет крана L_k, м	Размеры, мм				Размеры тележки, мм		Мощность электродвигателей, кВт			Номер двутавра для подкранового пути	Масса, кг
			h	h_1	l	l_1	база	ширина	подъема	передвижения тали	передвижения крана		
3,6	1	3	1120	260	660	300	1000	1350	1,7	0,18	0,36	18	590
	2		1360	320	710		1000	1350	2,8	0,40	0,54	24	785
	3,2		1635	325	750		1000	1365	4,5	0,70	0,80	30	1060
	5		1910	390	900		1500	2095	7,0	1,20	1,20	30	1470
5,1	1	4,5	1125	265	660	300	1000	1350	1,7	0,18	0,36	18	695
	2		1360	330	710		1000	1350	2,8	0,40	0,54	24	895
	3,2		1645	335	750		1000	1365	4,5	0,40	0,80	30	1180
	5		2010	490	900		1500	2095	7,0	1,20	1,20	30	1745
7,8	1	6	1125	265	660	900	1500	1850	1,7	0,18	0,36	24	860
	2		1360	330	710		1500	1850	2,8	0,40	0,54	30	1100
	3,2		1705	395	750		1500	1865	4,5	0,40	0,80	36	1460
	5		2010	490	900		1800	2395	7,0	1,20	1,20	36	2070
10,8	1	9	1125	265	660	900	1800	2150	1,7	0,18	0,36	24	1045
	2		1420	390	710		1800	2150	2,8	0,40	0,54	30	1425
	3,2		1795	485	750		1800	2165	4,5	0,40	0,80	36	1945
	5		2160	640	900		2100	2695	7,0	1,20	1,20	36	2480

8.24. Технические характеристики мостовых кранов с электроприводом

Грузоподъемность, т	Пролет L_k, м	Размеры, мм									Масса крана, т
		H	h	h_1	l_1	l_2	l_3	l_4	B	B_1	
5	11...32	1650	50	—	—	—	1100	800	5000...6500	3500...5000	13,6...33,3
10	10,5...34,5	1900	500	—	—	—	1200	1100	5508...5802	4400...5000	11...34,9
12,5	10,5...34,5	1410	500	—	—	—	1330	1300	6200...7200	4500...5500	16,3...40,8
15	11...26	2300	600	—	—	—	1300	1100	5600	4400	20,5...34,4
15/3*	11...26	2300	600	100	1300	1950	2250	1000	5600	4400	20,5...34,4
20/5	10,5...25,5	2400	600	50	1120	2000	1280	1280	5600	4400	23...40,5
30/5	10,5...31,5	2750	400	300	1600	1910	2560	950	6300	5100	33,5...66
50/12,5	19,5...31,5	3060	370	40	1900	1970	3000	870	6855	5600	45,5...82,5
80/20	10...34	3700	1300	200	3200	1400	1900	2700	—	—	80...150
100/20	10...34	3700	1500	200	3200	1400	1900	2700	—	—	80...160
125/20	10...34	3700	1600	200	3200	1400	1900	2700	—	—	90...170
160/32	9,5...33,5	4600	1450	250	3900	1800	2500	3200	10200...10500	—	110...215
200/32	9,5...33,5	4800	1500	0	3900	1800	2500	3200	10500	—	135...225
250/32	9,5...33,5	4800	1500	0	3900	1800	2500	3200	11200	—	160...235
320/32	9,5...33,5	3900	2250	850	3900	1800	2500	3200	13400	—	195...320

* В числителе — грузоподъемность основного крюка, в знаменателе — вспомогательного.

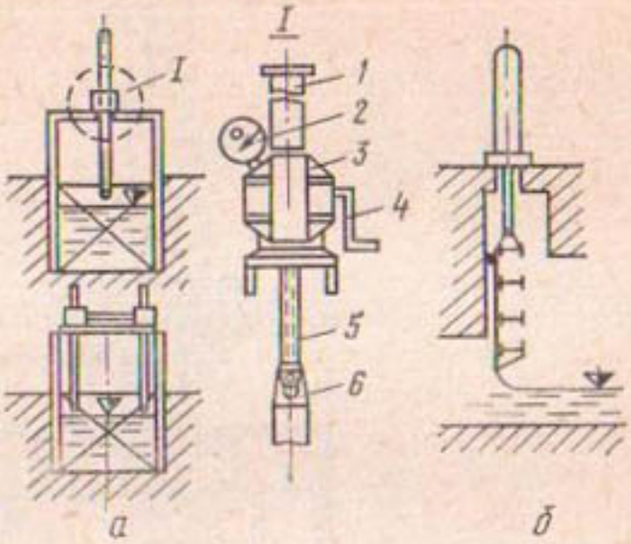


Рис. 8.18. Схемы установки подъемников:

а — винтового; *б* — гидравлического; *1* — кожух для свободного конца винта; *2* — указатель положения затвора; *3* — грузовой редуктор; *4* — рукоятка ручного подъема; *5* — грузовой винт; *6* — подвеска винта к затвору

Подвесные краны (кран-балки), перемещающиеся по двум неподвижным балкам двутаврового сечения, используют при массе монтажной единицы до 5 т (рис. 8.17, *б*, *в*; табл. 8.22, 8.23).

Мостовые краны, перемещающиеся по двум неподвижным балкам, которые укрепляют на несущих колоннах зданий НС, служат для подъема и транспортировки оборудования массой более 5 т (рис. 8.17, *г*, табл. 8.24). Для маневрирования затворами мостовые краны применяют только на крупных сооружениях. В большинстве случаев применяют козловые краны, не требующие эстакад и более удобные для строительно-монтажных работ. Краны выполняют с большим диапазоном грузоподъемности — до 400...500 т и вспомогательным крюком меньшей грузоподъемности (10...20% грузоподъемности главного крюка).

Механические подъемники затворов выполняют винтовыми и реже реечными. Грузовые винты и рейки перемещаются поступательно и передают усилие на затвор без дополнительных элементов. Это механизмы средней или малой грузоподъемности (до 15...20 т в одном тяговом органе). При большой грузоподъемности они становятся тяжелыми и неконструктивными. Ими оборудуют затворы небольших плотин, регуляторов, водосбросов и водовыпусков на каналах оросительных систем и на средне- и низконапорных водохранилищных гидроузлах при плотинах из грунтовых материалов. Слабое место их грузовые винты, которые при посадке затвора на порог или при заклинивании его в пазах работают на продольный изгиб и могут потерять устойчивость. Для ограничения сжимающего усилия двигатель соединяют с редуктором через муфту ограничения момента, а рукоятку ручного подъема — через фрикционную муфту. Небольшие винтовые подъемники присоединяют к затвору за одну точку, большие конструируют как на одну, так и на две точки подвеса (рис. 8.18). Грузовые редукторы правого и левого подъемников соединяют синхронизирующим валом. Механическая синхронизация при жесткой тяге (в отличие от лебедок с гибкой подвеской) достаточно совершенна. Для затворов, у которых точка подвеса смещается при маневрировании по горизонтали, подъемники конструируют с опиранием на шарниры, обеспечивающие их свободное качание.

Типовые конструкции винтовых подъемников показаны на рисунке 8.19, а их технические характеристики даны в таблице 8.25.

Гидроподъемники (рис. 8.20) — жидкостные сервомоторы, у которых тяговое усилие создается благодаря разности давлений рабочей жидкости (очищенного минерального масла — турбинного или веретенного) с двух сторон от поршня. Рабочая длина цилиндра (без учета зазоров между крышками и поршнем в его крайних положениях) равна ходу затвора. Отечественные гидроподъемники выполняют с рабочим ходом до 12 м. Давление масла до 30 МПа создает маслонапорная установка, грузоподъемность до 1000 т на один цилиндр. Слабое место гидроподъемников, как и других механизмов с жесткой тягой, — штоки, которые при дожиме затвора на закрытие или при его заклинивании работают на продольный изгиб и могут потерять устойчивость. Ориентировочно дожимное усилие гидропривода не превышает 50...70% тягового. Гидроподъемники нашли широкое применение на всех сооружениях, где можно создать маслонапорные установки и обеспечить их нормальную эксплуатацию: на водосливных плотинах, судоходных шлюзах, в зда-

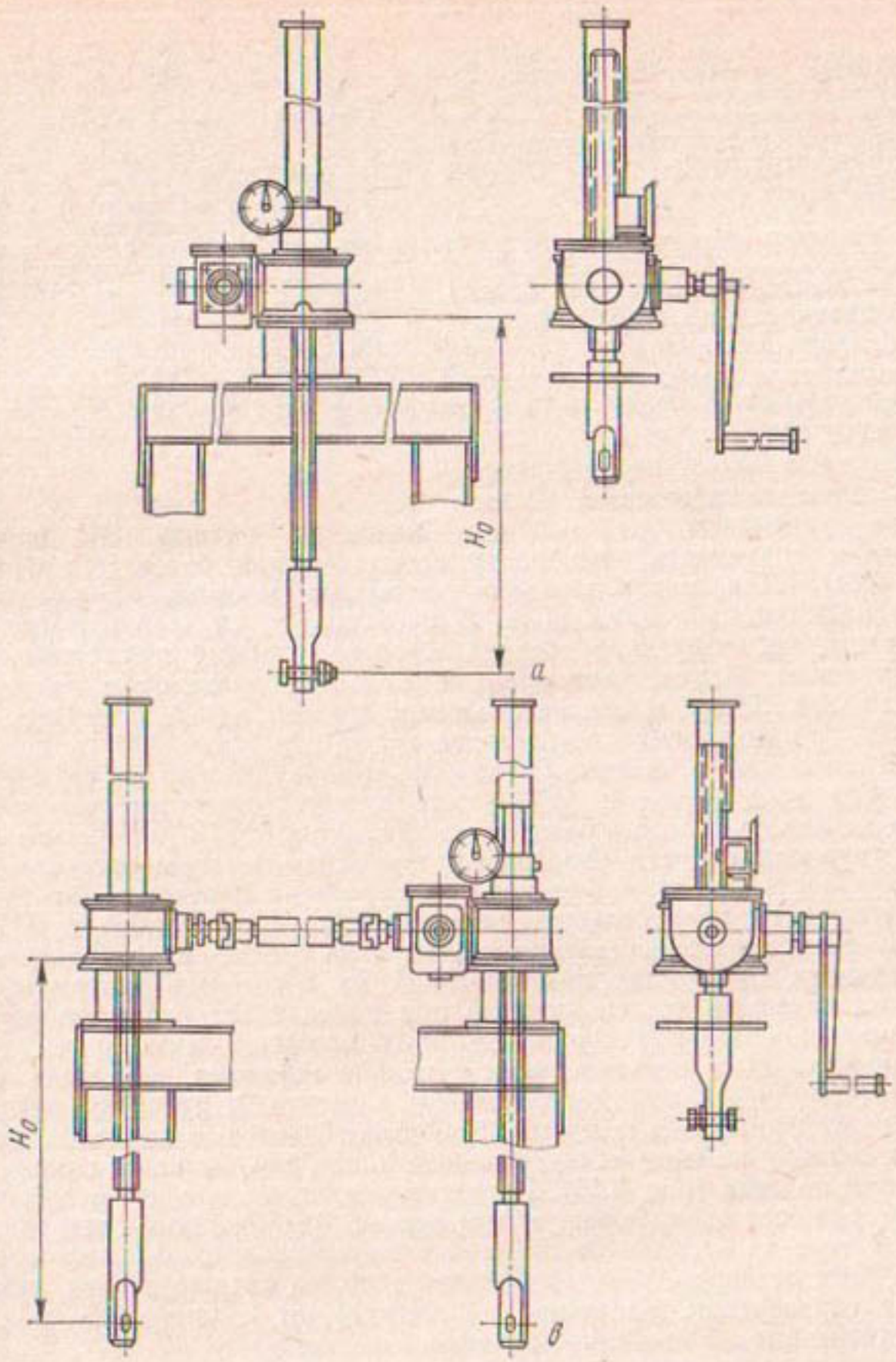


Рис. 8.19. Типовые подъемники:

а, б — одновинтовой с ручным и с электроприводом; *в, г* — двухвинтовой с ручным и с электроприводом

ниях ГЭС и крупных НС, на водосбросных и водоприемных сооружениях. Основные преимущества гидроподъемников перед другими видами механизмов: значительная грузоподъемность и достаточные дожимные усилия при относительно малых габаритах; возможность полной автоматизации и дистанционного управления; надежность в чрезвычайных условиях (сейсм, ураган); удобство компоновки. Недостатки: трудность зимней эксплуатации на открытом воздухе в суровых климатических условиях из-за загустевания масла; просадка под действием веса затворов, длительно подвешенных на гидроподъемниках.

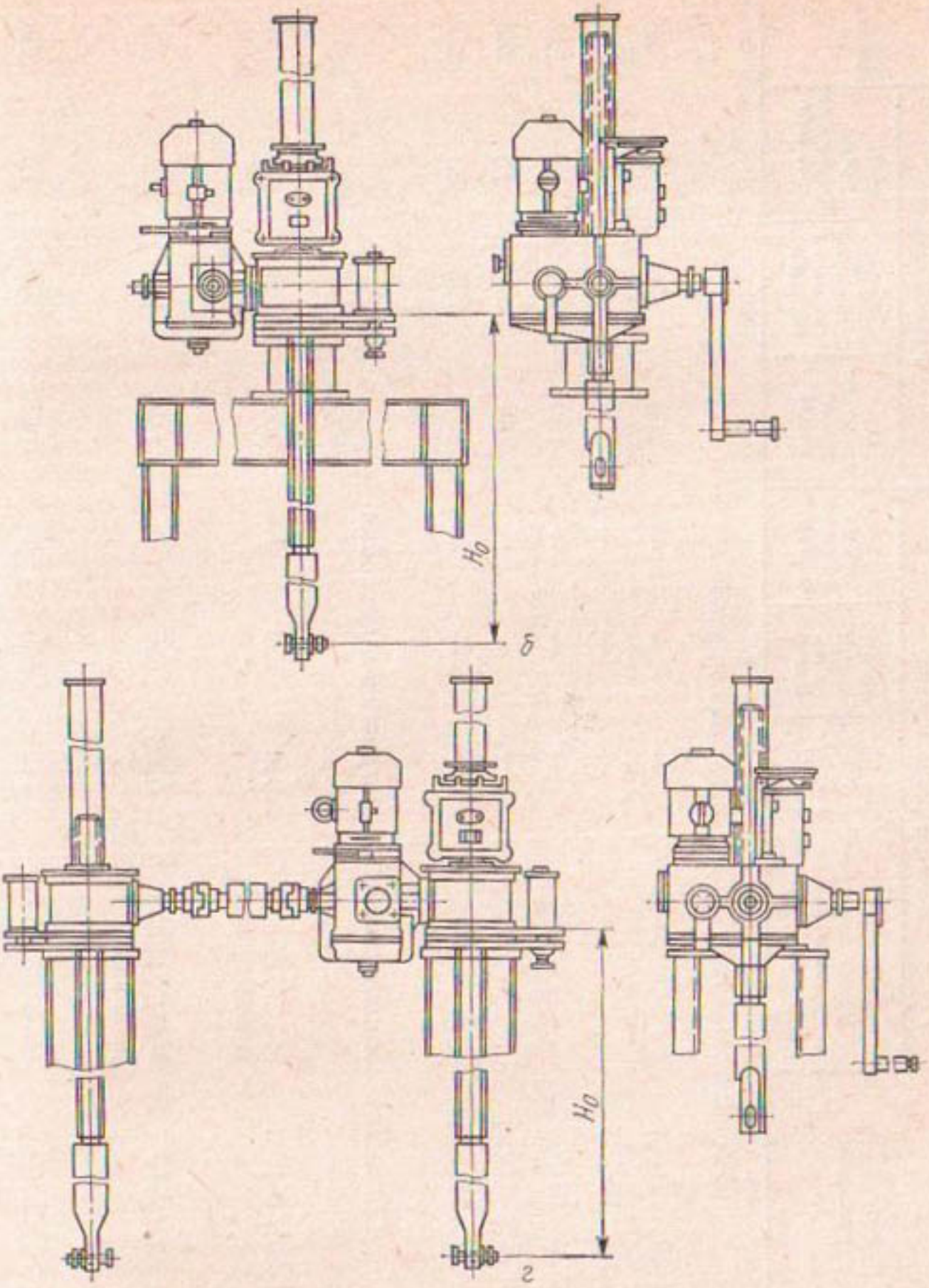


Рис. 8.19 (продолжение)

8.6.2. СОЕДИНЕНИЯ ЗАТВОРОВ И МЕХАНИЗМОВ

Тяговые органы к поступательно перемещаемым затворам (плоским, сандорным, вертикальным цилиндрическим) присоединяют непосредственно или через систему блоков (грузовой полиспаст) с помощью цилиндрических шарниров. Узлы присоединения подвесок к затвору совмещают с опорно-концевыми стойками или вертикальными диафрагмами. Если точка подвеса глубоко погружена под воду или находится ниже площадки установки механизма, штоки гидроподъемников и полиспасты канатных механизмов соединяют с затвором через цепь из звеньев стальных штанг, рассчитанных на полное усилие, прикладываемое к точке подвеса. Если цепь штанг доступна для обслуживания, в них создают окна для установки подхватов с шагом, равным шагу открытий затвора. Это позволяет укоротить канатные подвески, ис-

8.25. Технические характеристики винтовых подъемников

Марка подъемника	Усилие дожимное, т	$H_{o,\ max}$, м	Резьба винта грузового	Электрический привод				Ручной привод			Масса, кг
				марка электродвигателя	мощность, кВт	частота вращения, мин$^{-1}$	время подъема на 1м, мин	усилие на рукоятке, Н	число оборотов рукоятки на 1 м подъема	время подъема на 8 м, мин	
Одновинтовые подъемники с ручным приводом											
0,5В	0,6	2,35	Тч 40×12(P_6)	—	—	—	—	200	76	2	35
1В	1,2	2,90	Тч 50×16(P_8)	—	—	—	—	200	68	2,5	68
2,5В	3	3,65	Тч 60×16(P_8)	—	—	—	—	150	168	7	133
5В	6	4,20	Тч 70×20(P_{10})	—	—	—	—	140	360	15	235
10В	12	4,90	Тч 80×20(P_{10})	—	—	—	—	170	795	33	357
Одновинтовые подъемники с электрическим приводом											
1ЭВ	1,2	2,93	Тч 50×16(P_8)	ЧАС 71А6Ц1 исполнение М 302	0,4	920	8	60	72	3	121
2,5ЭВ	3	3,65	Тч 60×16(P_8)	ЧАС 71В6У1 исполнение М 302	0,63	920	8	150	168	7	172
5ЭВ	6	4,2	Тч 70×20(P_{10})	ЧАС 80 6У1 исполнение М 302	1,2	860	5	140	360	15	308

10ЭВ	12	4,9	Тч 80×20(P_{10})	ЧАС 90 6УI исполнение М 302	1,7	900	5	240	480	20	440
20ЭВ	22	5,5	Тч 90×21(P_{12})	ЧАС 100 6УI исполнение М 302	2,6	920	6	500	795	53	598
				Двухвинтовые подъемники с ручным приводом							
5ВД	2×3	3,65	Тч 60×16(P_8)	—	—	—	—	120	435	18	325
10ВД	2×6	4,2	Тч 70×20(P_{10})	—	—	—	—	230	455	19	501
20ВД	2×12	4,9	Тч 80×20(P_{10})	—	—	—	—	380	990	41	721
				Двухвинтовые подъемники с электрическим приводом							
5ЭВД	2×3	3,65	Тч 60×16(P_8)	ЧАС 80 6УI исполнение М 302	1,2	860	8	350	216	9	337
10ЭВД	2×6	4,2	Тч 70×20(P_{10})	ЧАС 90 6УI исполнение М 302	1,7	900	5	310	460	19,0	585
20ЭВД	2×12	4,9	Тч 80×20(P_{10})	ЧАС 100 6УI исполнение М 302	2,6	920	6	500	960	40,0	852

Примечание. Марка подъемника содержит величину общего тягового усилия подъемника, т. Посадочное усилие равно тяговому.

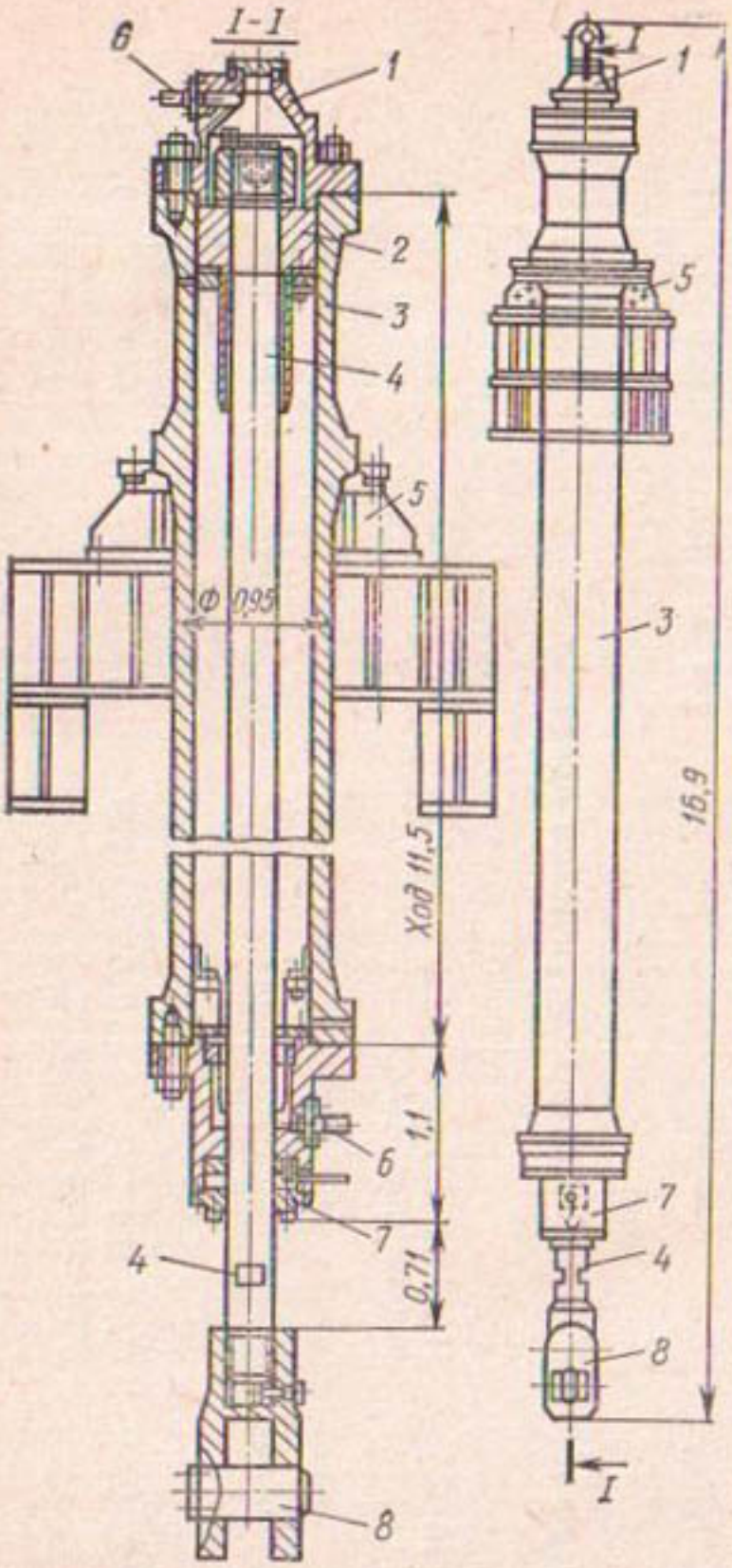


Рис. 8.20. Гидроподъемник грузоподъемностью 300 т:

1 — крышка; *2* — поршень; *3* — цилиндр; *4* — шток; *5* — несущая опора; *6* — напорный и сливной трубопроводы для масла; *7* — сальник; *8* — подвеска затвора

ключить длительную эксплуатацию канатов под водой, уменьшить их вытяжку, облегчить и ускорить маневрирование затворами, а также подвешивать затвор в пазах, освобождая передвижной механизм для других операций. При использовании гидроподъемников применение штанг сводит к минимуму необходимую длину штоков. Однако с применением штанг у механизмов с жесткой тягой исчезает возможность дожима затвора.

Тяговые органы присоединяют к двухстворчатым воротам и затворам, перемещаемым вращением или перекатыванием, через кинематические схемы, преобразующие поступательное движение во вращательное, с помощью следующих приспособлений:

гибкой подвески (каната или пластинчатой цепи), сматываемой с цилиндрической поверхности затвора или с его фланца (рис. 8.21, *а*), — небольшие сегментные, вальцовые, полноповоротные затворы; механизм устанавливают на быках или служебных мостах минимально возможной высоты. Сегментные затворы, снабженные такой подвеской, можно поднять до уровня расположения механизма;

гибкой подвески, изменяющей в пространстве свой угол (угол α) по отношению к механизму и к затвору (рис. 8.21, *б*), — сегментные и клапанные затворы. Механизм должен быть установлен выше, чем при предыдущей схеме. Для фиксации направления входа канатов в механизм применяют полиспасты, а также неподвижные блоки;

жесткой тяги и качающегося привода — винтового или гидроподъемника (рис. 8.21, *в*) — сегментные, клапанные, дисковые, шаровые, поворотные цилиндрические затворы и двухстворчатые ворота. Опоры приводов качающиеся, расстояние от них до затвора конструктивно минимально, что важно для глубинных затворов;

кривошипно-шатунного соединения (рис. 8.21, *г*) — сегментные затворы, прямые и обратные, клапанные, дисковые, шаровые, поворотные цилиндрические. Используют механизмы как с гибкой, так и с жесткой тягой; в последнем случае расстояние от затвора до привода можно сделать минимальным.

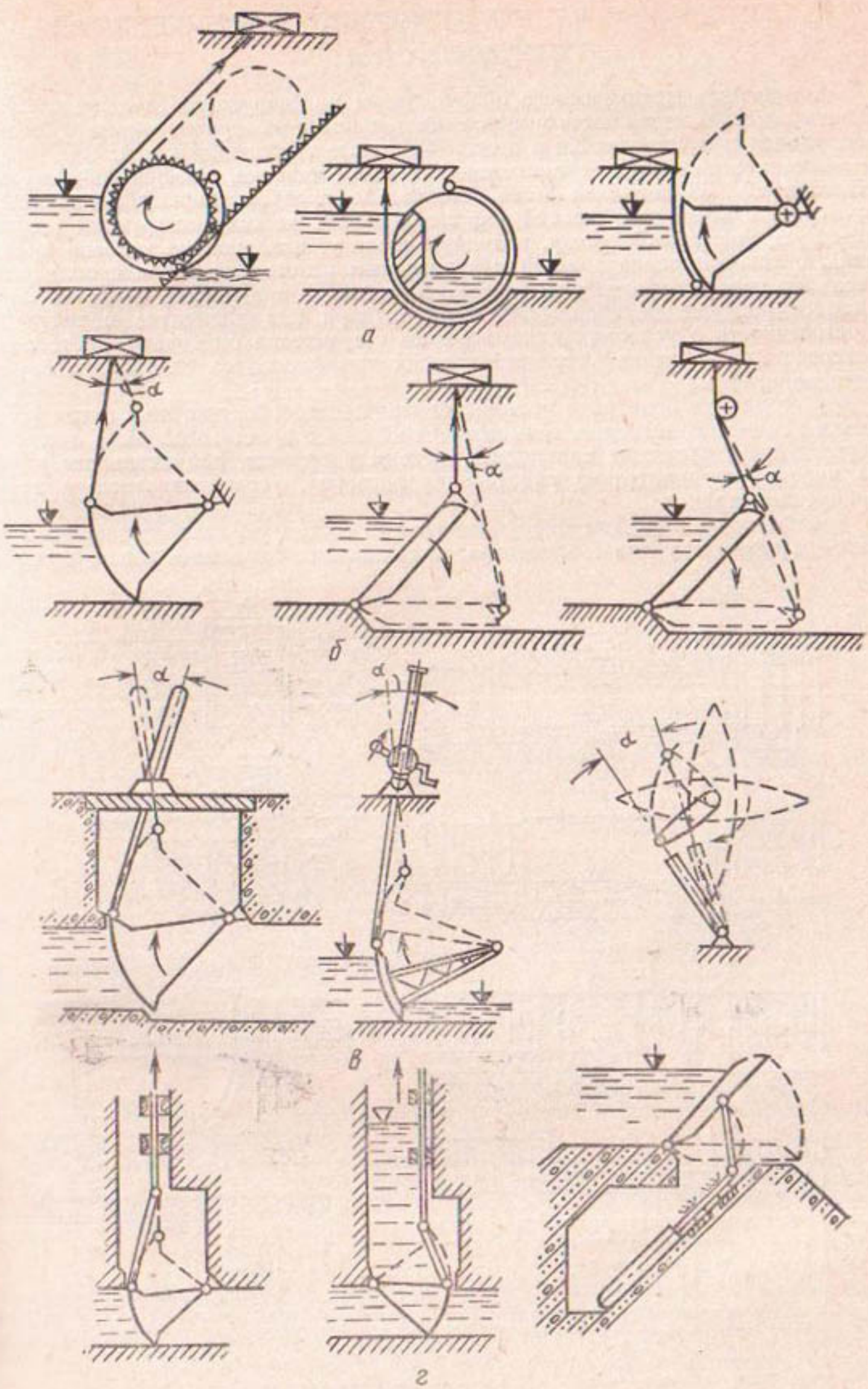


Рис. 8.21. Схемы соединения вращающихся затворов с механизмами:
а — со сматываемой гибкой подвеской; *б* — с переменным углом гибкой подвески; *в* — с качающимся приводом; *г* — с кривошипно-шатунной передачей

8.7. КОМПОНОВКА МЕХАНИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ

Компоновка механического оборудования на сооружении должна обеспечивать высокую надежность выполнения заданных эксплуатационных функций оборудования и сооружения в целом. Основные требования к ней:

обеспечение заданной долговечности оборудования, которая обычно составляет 20...30 лет. Для этого обязательно предусматривают мероприятия по борьбе с электрохимической коррозией металлических конструкций (периодическую очистку и окраску, катодную защиту, надлежащие условия хранения); с кавитационной эрозией и абразивным износом затворов и облицовок (если их невозможно избежать, предусматривают применение в местах ожидаемого разрушения сменных деталей затвора или элементов облицовки). Долговечность в условиях динамического нагружения оценивают расчетом и обеспечивают введением соответствующих коэффициентов запаса при проектировании;

возможность осмотра и ремонта механического оборудования путем установки ремонтных затворов, возможности наиболее простого подъема затворов в ремонтное положение или подхода к ним в пролете, рационального выбора числа последовательно работающих затворов, устанавливаемых в водопропускном тракте;

включение в комплекс оборудования или систем управления дополнительных (резервных) узлов и элементов, позволяющих выполнять эксплуатацион-

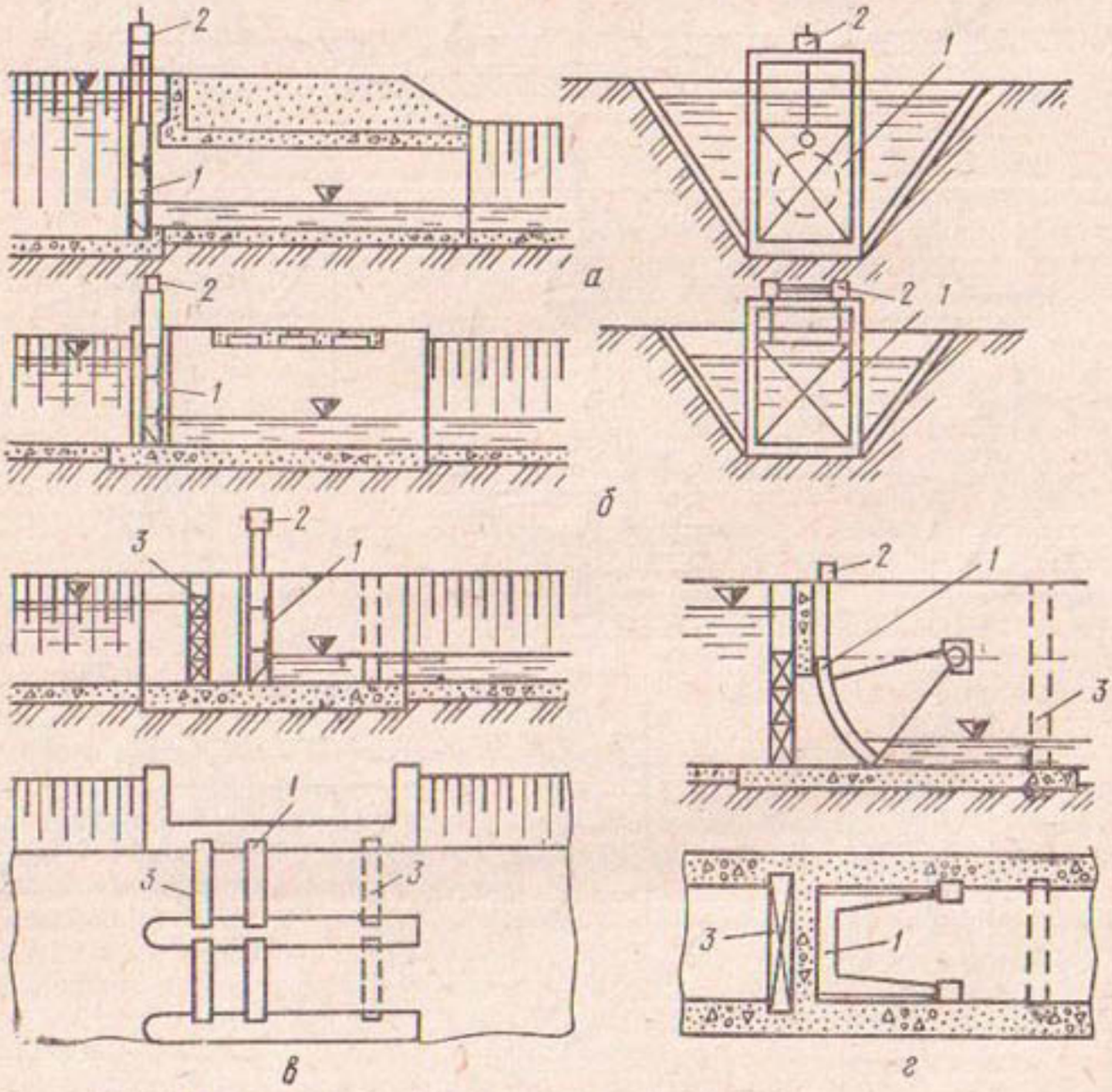


Рис. 8.22. Механическое оборудование регуляторов:

а — однопролетного трубчатого; *б* — однопролетного открытого; *в* — многопролетного открытого; *г* — диафрагменного; *1* — основной затвор; *2* — привод; *3* — ремонтный затвор

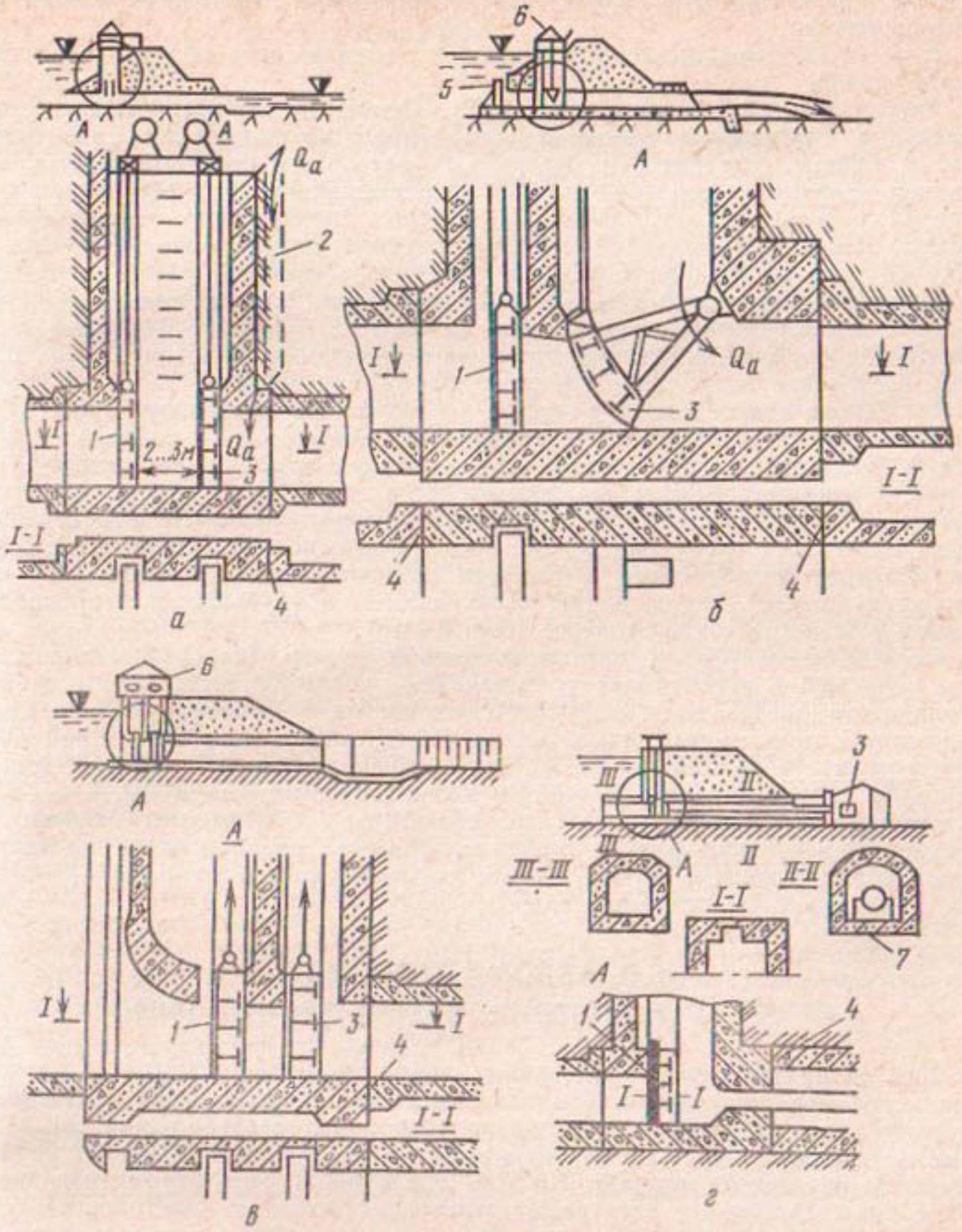


Рис. 8.23. Механическое оборудование трубчатых водосбросов в плотинах из грунтовых материалов:

а, б — с башнями в плотине; *в* — с башней на входе; *г* — с основным затвором на трубопроводе; *1* — аварийно-ремонтный затвор; *2* — аэрационная труба; *3* — основной затвор; *4* — швы с уплотнениями; *5* — ремонтный затвор; *6* — служебное помещение; *7* — галерея с трубопроводом

ные операции при выходе из строя основных узлов, дублирование управления механизмами и источников энергии (электропитание по двум линиям, возможность подачи масла от резервного насоса и т. п.);

создание условий для временного выполнения функций одного затвора другим в одном и том же отверстии;

аварийная защита оборудования, заключающаяся в установке аварийных затворов перед теми основными, выход которых из строя может привести к серьезным последствиям, в защите механизмов и подвесок затворов от пе-

регрузок и поломок, в блокировке против ошибочных действий персонала при маневрировании.

Ниже приведены примеры компоновок механического оборудования гидросооружений.

Регуляторы на каналах (рис. 8.22). Основные затворы — плоские или сегментные, снабженные стационарными винтовыми подъемниками с электрическим и ручным управлением. Аварийный затвор не предусматривают, его функции выполняет основной затвор вышерасположенного регулятора. Ремонтный затвор (только для многопролетных регуляторов) устанавливают вручную или (при пролетах более 2 м) автомобильным краном с площадки сбоку от регулятора или с дороги. При числе пролетов более двух для установки шандор можно использовать тельфер или ручную таль. Такова же компоновка оборудования регуляторов на входе в береговые открытые водосбросы, где ремонтные затворы применяют при любом числе пролетов, если порог регулятора не осушается после прохождения паводка.

Трубчатые водосбросы в плотинах из грунтовых материалов (рис. 8.23). Затворы сосредоточены в башне управления; подъемные механизмы стационарные. Как правило, устанавливают два затвора: аварийно-ремонтный и основной, с маневрированием без дожима. При обосновании предусматривают ремонтный затвор (рис. 8.23, *б*, *в*), вынесенный перед башней. С конструкцией башни совмещают трубу для подачи воздуха за основной затвор при его работе. Распространены схемы с выносом основных затворов (конусных или плоских задвижек) на выходную часть стального трубопровода, прокладываемого в железобетонной галерее (рис. 8.23, *г*).

Водосбросы бетонных плотин. Основной затвор (плоский, сегментный, реже конусный и игольчатый) устанавливают таким образом, чтобы он мог регулировать расход воды при истечении потока в атмосферу (либо непосредственно, либо в безнапорный отводящий водовод с гарантированной аэрацией потока); аварийно-ремонтный затвор (плоский, а в трубопроводах — дисковый) помещают непосредственно перед основным. На входе в водовод предусматривают ремонтный затвор, обязательно снабжаемый байпасом и опускаемый в стоячую воду с гребня плотины по направляющим на ее напорной грани. Схемы с двумя рядами затворов применяют редко — обычно для временных и строительных водосбросов.

8.8. АВТОМАТИЗАЦИЯ МАНЕВРИРОВАНИЯ ЗАТВОРАМИ

Для автоматического поддержания заданного уровня воды или расхода используют две принципиально различные схемы. Первая схема — изменение регулируемого затвором уровня или расхода воды регистрируется специальными датчиками и через электрическую схему управляющее воздействие дистанционно передается приводу. По этой схеме могут быть автоматизированы любые типы затворов с электрифицированным приводом. Достоинства: универсальность по типам затворов и простота настройки на любые значения регулируемых параметров. Недостаток: независимые от затворов датчики и управляющие линии, снижающие надежность системы в целом, а также необходимость надежного энергоснабжения.

Вторая схема — изменение регулируемого уровня воды воспринимается непосредственно затвором в виде нарушения равновесия действующих на него сил, вследствие чего затвор меняет свое первоначальное положение на новое, обеспечивающее баланс сил при измененном уровне. Достоинство: не требуется управляющих линий и датчиков. Недостаток: применима лишь для конструкций вододействующих и полувододействующих затворов. В настоящее время предложено более 40 конструкций затворов-автоматов. Для мелиоративных систем эта схема наиболее приемлема, так как исключает внешние энергоисточники и сокращает вмешательство персонала.

Глава 9 МЕЛИОРАТИВНЫЕ НАСОСНЫЕ СТАНЦИИ

9.1. ОСНОВНЫЕ ТИПЫ И СХЕМЫ ГИДРОУЗЛОВ НС

Насосная станция — комплекс гидротехнических сооружений и оборудования, обеспечивающий водозабор из источников орошения или осушительного канала, подъем и транспортировку воды к месту потребления или отвода ее в аккумулирующую емкость.

По функциональному назначению НС делят на оросительные (для подъема воды в оросительные каналы, осушительно-оросительные и осушительно-увлажнительные системы), осушительные (для отвода воды с мелиорированных площадей), подкачечные (для подачи воды в закрытые оросительные системы).

По подаче, независимо от назначения и напора, имеются НС малой подачи — до 1 м³/с; средней — 1...10, большой — 10...100 и уникальные — с подачей более 100 м³/с.

По источнику энергии различают НС электрифицированные и тепловые (с приводом от двигателя внутреннего сгорания).

По конструкции НС бывают стационарные, не меняющие своего местоположения, и передвижные, представляющие собой мобильные устройства для перекачки воды. Работают НС сезонно или круглогодично.

По надежности подачи или откачки воды мелиоративные НС разделяют на три категории:

первая — в аварийных ситуациях допускается кратковременный, до 5 ч, перерыв в подаче или снижение ее до 50% расчетной на срок до 3 сут; к ней относят каскады крупных и уникальных оросительных НС, обслуживающие крупные массивы с ценными сельскохозяйственными культурами, крупные осушительные НС, имеющие ограниченную аккумулирующую емкость каналов осушительной системы; к особой группе первой категории надежности относят осушительные НС, защищающие от затопления территорию населенного пункта или промышленного предприятия и допускающие лишь кратковременный перерыв в подаче воды на время, необходимое для включения резервного электроснабжения или технологического оборудования;

9.1. Класс сооружений и категории НС как потребителя электроэнергии

Категория надежности НС	Класс сооружений, кроме участвующих в создании напорного фронта	Категории потребителя электроэнергии
Первая	На единицу выше, чем по таблице 1.2 для соответствующих размеров обслуживаемой площади	Вторая
Особая группа первой категории	То же	То же, но с обязательным питанием от двух независимых взаимно резервируемых источников
Вторая	По таблице 1.2 в зависимости от размеров обслуживаемой площади, но не ниже III для основных и IV для второстепенных сооружений	Третья
Третья	IV	»

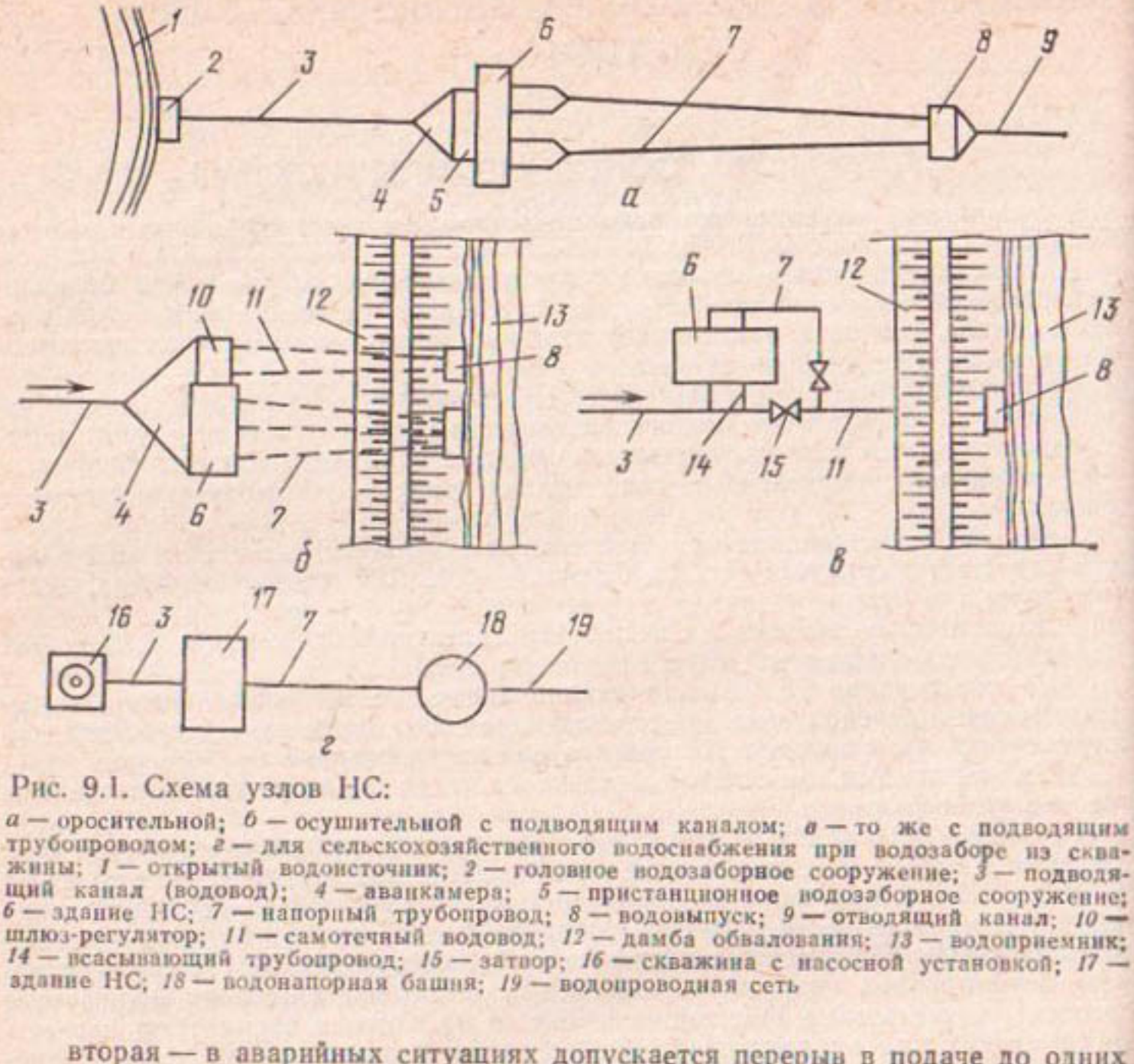


Рис. 9.1. Схема узлов НС:

а — оросительной; *б* — осушительной с подводящим каналом; *в* — то же с подводящим трубопроводом; *г* — для сельскохозяйственного водоснабжения при водозаборе из скважины; *1* — открытый водоисточник; *2* — головное водозаборное сооружение; *3* — подводящий канал (водовод); *4* — аванкамера; *5* — пристанционное водозаборное сооружение; *6* — здание НС; *7* — напорный трубопровод; *8* — водовыпуск; *9* — отводящий канал; *10* — шлюз-регулятор; *11* — самотечный водовод; *12* — дамба обвалования; *13* — водоприемник; *14* — всасывающий трубопровод; *15* — затвор; *16* — скважина с насосной установкой; *17* — здание НС; *18* — водонапорная башня; *19* — водопроводная сеть

вторая — в аварийных ситуациях допускается перерыв в подаче до одних суток или снижение ее до 50% расчетной на срок до 5 сут; к ней относят крупные и средние НС, обслуживающие более 5 тыс. га с посевами ценных сельскохозяйственных культур;

третья — в аварийных ситуациях допускается перерыв в подаче до 5 сут; к ней относят все остальные НС.

Класс сооружений НС назначают в зависимости от площади, обслуживаемой мелиоративной системой, категории надежности, категории как потребителей электроэнергии (табл. 9.1).

В состав гидроузла НС в общем случае входят: водозаборное сооружение с рыбозащитными устройствами, подводящий канал или закрытый водовод, аванкамера, здание НС с трансформаторной подстанцией, напорный трубопровод и водовыпускное сооружение. На узлах осушительных станций может быть предусмотрена и самотечная подача воды в бьеф с более низким уровнем.

Подача воды на орошение в зависимости от топографических условий и высоты подъема осуществляют в одну или несколько ступеней, то есть каскадом НС.

Схемы компоновок гидротехнических узлов, наиболее часто встречающиеся в практике, показаны на рисунке 9.1.

Компоновка сооружений НС, длины подводящего канала и напорных трубопроводов, число НС в каскаде определяют технико-экономическими расчетами.

В настоящее время в основном применяют групповую работу дождевальных машин с централизованной подачей воды: одна НС обслуживает один или несколько севооборотных участков.

Децентрализованную подачу воды осуществляют по схеме: низконапорная НС — один или несколько севооборотных участков.

Децентрализованную подачу воды осуществляют по схеме: низконапорная НС — один или несколько распределительных трубопроводов — подкачечные НС — оросительные трубопроводы — дождевальные машины. Децентрализованная подача воды позволяет исключить применение высоконапорных железобетонных и металлических труб для оросительной сети при поливе широкозахватными дождевальными машинами.

9.2. НАСОСНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ МЕЛИОРАТИВНЫХ НС

9.2.1. ПАРАМЕТРЫ НАСОСОВ И НАСОСНЫХ УСТАНОВОК

Подача насоса Q, м³/с, м³/ч, л/с; *напор насоса* H, м; *коэффициент полезного действия* η (отношение полезной мощности к потребляемой).

Мощность, потребляемая насосом, кВт,

$$N = \rho_w g H Q/\eta, \text{ для воды при } Q \text{ в м}^3/\text{с } N = 9{,}81 QH/\eta. \qquad (9.1)$$

Электроэнергия, потребляемая насосной установкой, кВт/ч,

$$E = HV/367\eta_{ну}, \qquad (9.2)$$

где V — объем перекачиваемой воды, м³; $\eta_{ну}$ — КПД насосной установки, равный произведению КПД насоса η, электродвигателя η_m, силовых трансформаторов и кабелей η_c (обычно 0,96...0,98), узла передачи мощности от двигателя к насосу (обычно 1).

Мощность электродвигателя, кВт,

$$N_m \geqslant \gamma_s N, \qquad (9.3)$$

где γ_s — коэффициент запаса мощности, принимающий следующие значения в зависимости от мощности электродвигателя:

N_m, кВт	До 20	21...50	51...300	Более 300
γ_s	1,25	1,2	1,15	1,1

Частота вращения насоса, электродвигателя n, мин$^{-1}$, с$^{-1}$.

Коэффициент быстроходности насоса

$$n_s = 3{,}65 n \sqrt{Q}/H^{3/4}, \qquad (9.4)$$

где значения n (мин$^{-1}$), Q (м³/с), H (м) принимают при η_{max}; для насосов с двухсторонним входом воды в колесо (насосы типа Д) в расчете учитывают половину подачи насоса, для многоступенчатых насосов — напор, приходящийся на одну ступень насоса.

Допускаемые вакуумметрическая высота всасывания H^v_{adm} или *кавитационный запас* Δh_{adm}

$$H^v_{adm} = H_a - H_{пж} - \Delta h_{adm} + v_w^2/2g \qquad (9.5)$$

или

$$\Delta h_{adm} = H_a - H_{пж} - H^v_{adm} + v_w^2/2g,$$

где v_w — скорость воды во всасывающей магистрали перед насосом, м/с, обычно $v_w = 1...1{,}5$ м/с; H_a — напор воды при атмосферном давлении, зависящий от высоты над уровнем моря:

высота над уровнем моря, м	0	200	400	600	800	1000	1500	2000	3000
H_a, м	10,3	10,1	9,8	9,6	9,4	9,2	8,6	8,1	7,2

$H_{пж}$ — упругость насыщенных паров жидкости при различной температуре воды приведена ниже:

температура воды, °С	0	10	20	30	40	50	60	70
$H_{пж}$, м	0,06	0,12	0,24	0,43	0,75	1,26	2,03	3,18

В каталогах обычно приводят значения H°_{adm} для $H_a=10$ м и $H_{пж}$ при $t=20...35$ °С.

Геометрическая высота всасывания насоса $h_в$ — расстояние по вертикали (м) от уровня воды в источнике до оси напорного патрубка вертикального центробежного насоса, верхней отметки лопасти рабочего колеса горизонтального осевого насоса, отметки горизонтальных осей вращения лопастей относительно втулочной части, вертикального осевого насоса. Высота всасывания положительна, если указанные выше отметки насоса расположены выше уровня в источнике, и отрицательна, если ниже. Допускаемую геометрическую высоту всасывания $h_{в,adm}$ определяют по формуле

$$h_{в,adm} = H_a - H_{пж} - \Delta h_{adm} - h_{\Sigma в}, \qquad (9.6)$$

где $h_{\Sigma в}$ — потери напора во всасывающей линии насоса $h_{\Sigma в}=h_m+h_l$, м (h_m — местные потери; h_l — потери на трение по длине трубопровода); H_a и $H_{пж}$ — напор и упругость насыщенных паров жидкости в месте установки насоса.

У насосов, предназначенных для крупных и средних станций блочного типа, потери $h_{\Sigma в}$ учтены в кавитационных характеристиках.

Допускаемую отметку установки насоса рассчитывают по формуле

$$\triangle УН_{adm} = \triangle УВ_{ист} + h_{в,adm}, \qquad (9.7)$$

где $\Delta УВ_{ист}$ — отметка минимального уровня воды в источнике. Насос работает нормально, если отметка его установки $\Delta УН \leqslant \Delta УН_{adm}$.

Кривые зависимости H, N, η и $\Delta h_{в,adm}$ от Q при постоянном значении n называют *характеристиками насоса* (рис. 9.2). Насос с пологой характеристикой $H—Q$ выгоден при работе с малыми колебаниями напора, а с крутой характеристикой — при больших колебаниях напора и с малыми отклонениями подачи.

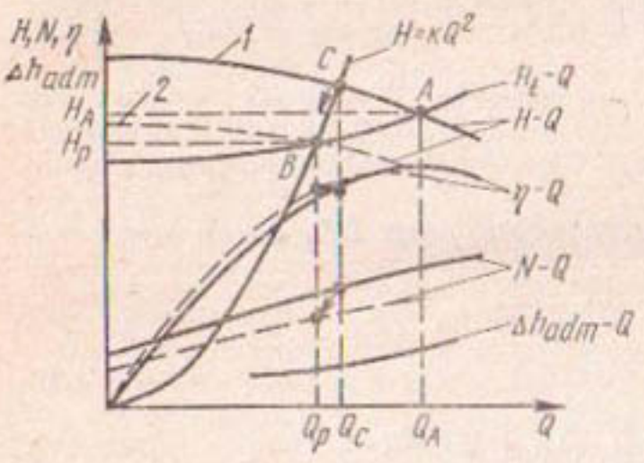


Рис. 9.2. Характеристики насоса:
1 — с диаметром рабочего колеса D (частотой вращения n); *2* — то же для D_1 (n_1)

9.2.2. ОСНОВНЫЕ ТИПЫ И МАРКИ НАСОСОВ

В мелиорации обычно применяют лопастные насосы общего назначения, допускающие перекачку воды с температурой до 85 °С и содержанием твердых включений не более 3 г на 1 л и размером не более 0,1...0,2 мм, из них абразивных не более 2%.

По принципу движения воды в рабочем колесе используют центробежные, осевые и диагональные насосы (последние редко). Центробежные насосы (табл. 9.2) классифицируют по следующим признакам: чис-

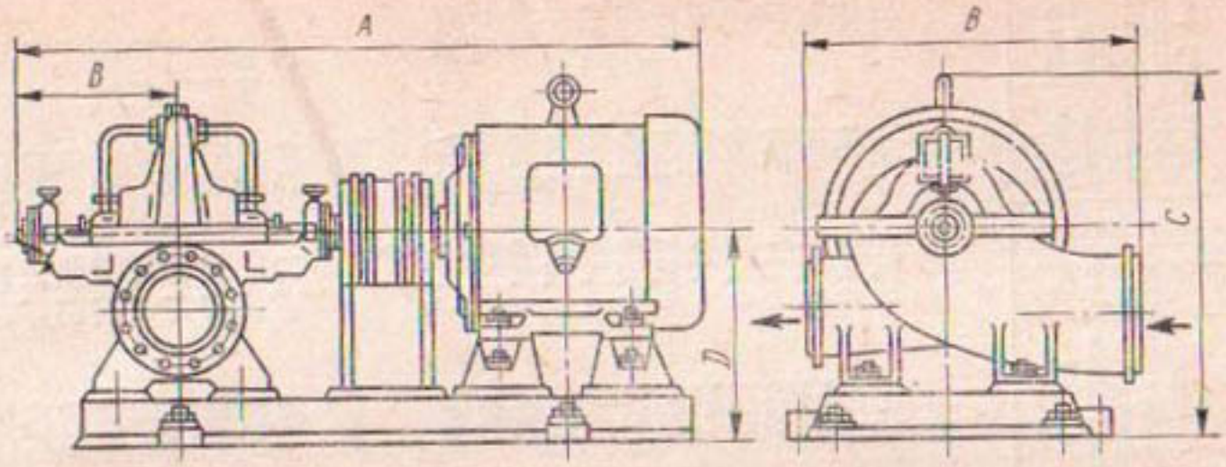


Рис. 9.3. Насос типа Д с электродвигателем на общем фундаменте:
A — длина; *B* — ширина; *C* — высота; *D* — расстояние от фундамента до оси насоса

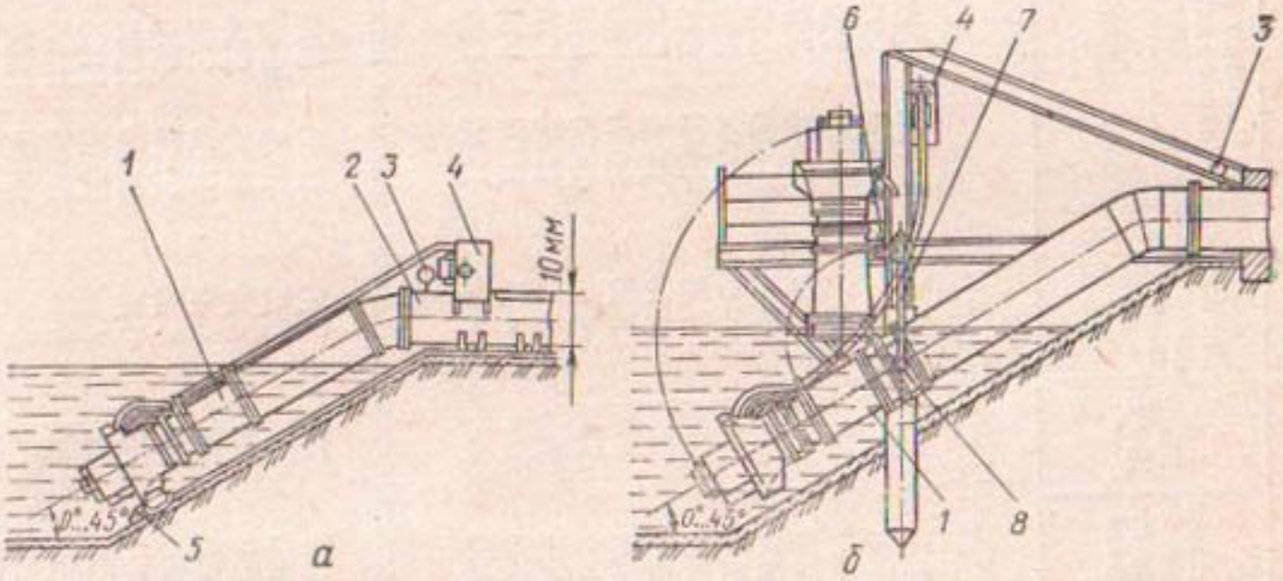


Рис. 9.4. Схемы установки погружных насосов типа ОПВ:
а — на салазках; *б* — на шарнире; *1* — электронасос; *2* — стационарный трубопровод; *3* — манометр; *4* — станция управления; *5* — упор; *6* — захват; *7* — тяги; *8* — шарнир

лу ступеней — одноступенчатые и многоступенчатые; создаваемому напору — низконапорные (до 25 м), средненапорные (25...60 м) и высоконапорные (свыше 60 м); по способу подачи воды в колесо — с односторонним и двухсторонним входом воды; по расположению вала — горизонтальные и вертикальные. При консольном расположении колеса на валу насосы называют консольными.

Осевые насосы (табл. 9.3) делят на одноступенчатые и многоступенчатые; по расположению вала — на горизонтальные и вертикальные; по создаваемому напору (до 20...25 м) их относят к низконапорным.

Наибольшее применение в мелиорации нашли центробежные насосы типа Д (рис. 9.3). Они более надежны в эксплуатации по сравнению с насосами типа К (КМ) и обладают более высокими КПД. Кроме того, корпус насоса имеет горизонтальный разъем в плоскости вала, что позволяет разбирать и ремонтировать насос без демонтажа трубопроводов.

Для заливки водой основных насосов, расположенных выше уровня воды в источнике, применяют водокольцевые вакуум-насосы (табл. 9.4).

Современное направление в конструкции насосов — погружные моноблочные электронасосы. Их преимущества — более упрощенный подвод воды, при эксплуатации не требуют специальных сухих помещений, возможна установка в горизонтальном, вертикальном и наклонном вариантах. Такие насосы устанавливают непосредственно в водозаборных сооружениях и на откосах

9.2. Технические характеристики центробежных насосов

Марка насоса	Подача Q, м³/ч	Напор H, м	Мощность двигателя $N_{дв}$, кВт	Частота вращения n, мин⁻¹	КПД η, %	Допускаемый кавитационный запас Δ_{adm}, м	Размеры агрегата (насос+двигатель), мм			Расстояние от фундамента до оси насоса D, мм	Масса агрегата, т	Диаметр патрубка, мм	
							длина A	ширина B	высота C			всасывающего	напорного
Горизонтальные консольные													
К-8/18 (1,5К-6)	8	18	1,5	2900	63	3,5	795	292	288	185	0,08	40	32
К-20/18 (2К-9)	20	18	2,2	2900	66	3	823	292	280	185	0,09	50	40
К-20/30 (2К-6)	20	30	4	2900	60	3	867	322	339	185	0,11	50	40
К-45/30 (3К-9)	45	30	7,5	2900	72	3,5	1084	367	405	225	0,17	80	50
К-45/55 (3К-6)	45	55	30	2900	63	4	1460	573	490	295	0,38	80	50
К-90/20 (4К-18)	90	20	7,5	2900	74	4,5	1084	367	405	225	0,17	100	80
К-90/35 (4К-12)	90	35	17	2900	78	5,3	1460	573	555	295	0,38	100	80
К-90/55 (4К-8)	90	55	30	2900	75	5,0	1425	575	555	295	0,38	100	65
К-90/85 (4К-6)	90	85	55	2900	67	5,0	1680	690	656	355	0,51	100	65
К-160/20 (6К-12)	160	20	30	1450	79	4	1490	575	555	300	0,48	150	100
К-160/30 (6К-8)	160	30	30	1450	75	4	1545	575	555	300	0,46	150	100
К-290/18 (8К-18)	290	18	22	1450	80	4,5	1505	575	555	300	0,44	200	150
К-290/30 (8К-12)	290	30	55	1450	79	4,5	1740	690	656	355	0,68	200	125
Горизонтальные с двухсторонним подводом воды к колесу													
Д200-36 (5НД$_в$)	200	36	40	1450	72	5,5	1685	800	801	500	0,91	150	125
Д200-95 (4НД$_в$)	200	95	110	2950	70	3,5	1975	640	870	450	1,10	150	100
Д320-50 (6НД$_в$)	320	50	75	1450	72	4,5	1805	966	897	550	1,23	200	150
Д320-70 (6НД$_с$)	320	70	100	2950	78	6,0	1860	730	847	500	1,13	200	150
Д500-65 (10Д6)	500	65	160	1450	76	4,5	2170	970	1045	700	1,79	250	150
Д630-90 (8НД$_в$)	630	90	250	1450	76	6,5	2520	1258	1127	700	2,82	250	200
Д800-57 (12Д-9)	800	57	250	1450	82	4	2518	1155	1197	700	2,99	300	250
Д1250-65 (12НД$_с$)	1250	65	500	1450	82	6	3100	1390	1750	750	4,15	350	300
Д1250-125 (14Д-6)	1250	125	630	1450	76	5	3480	1360	1855	785	6,24	350	200
Д1600-90 (14НД$_с$)	1600	90	500	1450	87	7	2865	1438	1460	785	4,73	400	350

Д2000-21 (16НД$_н$)	2000	21	160	980	85	5	2965	1350	1435	920	3,39	500	400
Д2000-100 (20Д-6)	2000	100	800	980	75	6,5	3960	1560	1660	1045	8,77	500	300
Д2500-62 (18НД$_с$)	2500	62	500	980	87	7,5	3555	2080	1630	1045	7,87	500	450
Д3200-33 (20НД$_н$)	3200	33	320	980	88	7	3685	1760	1785	1185	7,17	600	500
Д3200-75 (20НД$_с$)	3200	75	800	980	87	7,5	4200	2300	2046	1400	10,72	600	500
Д4000-95 (22НД$_с$)	4000	95	1600	1000	88	8	4730	2260	1760	1050	$\frac{4,96}{6,75}$	700	500
Д5000-32 (24НД$_н$)	5000	32	500	730	88	8	3870	2150	1900	1150	$\frac{5,00}{3,96}$	800	600
Д6300-27 (32Д-19)	6300	27	630	730	79	10	4020	2150	1900	1150	$\frac{5,00}{4,47}$	800	600
Д6300-80 (24НД$_с$)	6300	80	2000	750	87	7,5	5360	2385	2120	1250	$\frac{8,77}{9,40}$	800	600
Д12500-24 (48Д-22)	12 500	24	1250	500	87	3,2	5790	3100	3150	1780	$\frac{15,8}{7,5}$	1200	900
Горизонтальные многоступенчатые													
ЦНС38-44	38	44	7,5	2950	63	3,5	1287	460	572	342	0,18	75	75
ЦНС38-66	38	66	10	2950	63	3,5	1407	460	572	342	0,21	75	75
ЦНС38-88	38	88	17	2950	63	3,5	1567	460	560	330	0,24	75	75
ЦНС38-110	38	110	22	2950	63	3,5	1637	460	560	330	0,27	75	75
ЦНС38-138	38	138	30	2950	63	3,5	1816	560	605	372	0,30	75	75
ЦНС38-154	38	154	30	2950	63	4	1887	460	605	372	0,32	75	75
ЦНС38-20	38	220	40	2950	63	3,5	2097	460	645	412	0,41	75	75
ЦНС60-66 (4МС-10×2)	60	66	22	2950	66	3,5	1460	540	640	372	0,22	100	100
ЦНС60-99 (4МС-10×3)	60	99	30	2950	66	3,5	1645	540	632	362	0,25	100	100

Продолжение

Марка насоса	Подача Q, м³/ч	Напор H, м	Мощность двигателя $N_{дв}$, кВт	Частота вращения n, мин⁻¹	КПД η, %	Допускаемый кавитационный запас Δh_{adm}, м	Размеры агрегата (насос+двигатель), мм			Расстояние от фундамента до оси насоса D, мм	Масса агрегата, т	Диаметр патрубка, мм	
							длина A	ширина B	высота C			всасывающего	напорного
ЦНС60-132 (4МС-10×4)	60	132	40	2950	66	3,5	1725	540	632	362	0,29	100	100
ЦНС60-165 (4МС-10×4)	60	165	55	2950	66	3,5	1805	540	632	406	0,32	100	100
ЦНС60-330 (4МС-10×10)	60	330	100	2950	66	3,5	2995	540	720	450	0,52	100	100
ЦНС105-98 (5МС-10×2)	105	98	55	2950	71	4	2030	680	796	456	0,44	125	125
ЦНС105-147 (5МС-10×3)	105	147	75	2950	71	4	2125	680	796	456	0,50	125	125
ЦНС105-245 (5МС-10×5)	105	245	132	2950	71	4	2445	680	950	545	0,68	125	125
ЦНС180-85 (6МС-7×2)	180	85	75	1475	71	4	2165	740	926	556	0,63	150	150
ЦНС180-128 (6МС-7×3)	180	128	100	1475	71	4	2208	740	922	552	0,74	150	150
ЦНС180-297 (6МС-7×7)	180	297	250	1475	71	4,0	2747	740	940	570	1,16	150	150
ЦНС300-120 (8МС-7×2)	300	120	160	1475	73	4,5	3050	930	1290	830	1,67	200	200
ЦНС300-420 (8МС-7×7)	300	420	500	1475	73	4,5	3850	1080	1940	880	2,58	200	200
ЦН400-105 (3В-200×2)	400	105	200	1470	74	5,5	2647	1155	1148	675	2,84	350	250
ЦН400-210 (3В-200×4)	400	220	400	1480	75	5,5	3708	1155	1022	450	2,37	250	200
ЦН1000-180 (10НМК×2)	1000	180	630	1485	84	8	3550	1440	1457	730	2,34	250	200
ЦН3000-197 (28М-12×2)	3000	197	2500	1000	78	7	250	1350	2540		26,62	700	400

Крупные вертикальные

600В-1,6/100А (28В-12)	1,52	90	1600	750	88	13,5	2450	2300	4650	450	8,45	545	600
800В-2,5/40 (36В-22)	2,62	40	1600	600	87	12,5	2850	2316	4720	610	13,8	765	800
800В-2,5/100А (32В-12)	2,39	90	3200	600	88	13,5	2810	2850	4715	550	11,0	680	800
1000В-4/40 (44В-22)	3,76	40	1600	500	87	12,5	3160	2800	5335	550	13,2	920	1000
1000В-4/63 (40В-16)	3,41	60	3200	500	88	11,5	2810	2980	4510	550	13,0	815	1000
1200В-6,3/40 (58В-22)	5,34	25,6	3200	300	84	8	4075	3780	7000	0	35,0	1260	1200
1200В-6,3/63 (52В-17)	5,9	59	5 000	375	89	11,5	3675	3260	6150	0	23,8	1075	1200
1200В-6,3/100А (52В-11)	6,09	88	7 500	375	88	13,5	4190	4080	6850	0	34,1	1100	1200
1600В-10/40 (72В-22)	8,72	27,8	4 400	250	88	8,5	4850	4600	6220	0	34,16	1530	1600
2000В-16/63 (В17-16/55)	16	55	12 500	250	86	10,6	5870	5235	8610	0	100	1635	1600
2400ВР-25/25	25	25	8 000	187	86	16,5	7420	7220	7785	0	120	2200	2400
2400В-25/40	25	40	12 500	214	86	13,5	7420	7220	7785	0	118	2200	2400
2400В-25/100	25	100	32 000	214	86	12	6000	6650	6700	0	150	2200	2400

Примечания. 1. Насосы К-8/18...90/55 и 160/20 выпускают и в моноблочном варианте (тип КМ). 2. Числитель — массы насосов, знаменатель — массы двигателей; насос и двигатель устанавливают на отдельных фундаментах. 3. Насосы ЦНС38 в настоящее время выпускают с n=1450 мин$^{-1}$.

9.3. Технические характеристики осевых насосов

Марка насоса	Подача Q, м³/с	Напор H, м	Частота вращения n, мин⁻¹	КПД η, %	Допускаемый кавитационный запас Δh_{adm}, м	Размеры насоса, мм			Расстояние от фундаментной опоры до горизонтальной оси насоса, мм	Диаметр патрубка, мм		Мощность электродвигателя, кВт	Масса насоса, т	Масса двигателя, т
						длина A	ширина B	высота C		всасывающего	напорного			
Вертикальные														
ОВ5-47МБ	0,7	4,5	730	83	5	1365	1120	5639	1100...3000	520	585	55	2,945	—
ОВ5-47МБ	0,9	8	960	83	9	1365	1120	5639	1100...3000	520	585	110	3,920	—
ОВ5-47К	0,69	4,5	730	85	5	1760	890	2860	697	425	585	55	1,820	0,992
ОВ5-47К	0,9	8	960	85	9	1760	890	2860	697	425	585	110	1,820	1,0
ОВ6-55К	0,94	4,5	730	84	7	1760	1040	2870	660	600	645	75	2,0	1,0
ОВ6-55К	1,25	7,5	960	84	11	1760	1040	2870	660	600	645	125	2,0	1,6
ОВ5-55К	1,44	11	960	82	10	1760	1040	2915	660	600	645	200	2,1	2,1
Вертикальные с поворотными лопастями														
ОПВ16-87К	2,44	4,8	485	85	7,5	2240	1190	4400	760	950	990	315	4,43	4,9
ОПВ5-87К	3,19	9,7	585	85	10	2240	1190	4400	760	950	990	630	4,53	6,8
ОПВ2-87	2,97	13,6	585	86	11,5	2240	1190	4400	775	950	1010	630	4,67	6,8
ОПВ3-87	3,25	21	730	86	12,5	2240	1190	4400	775	950	1010	1 000	4,72	7,4
ОПВ16-110	3,69	4,2	365	85	6,5	2540	1375	5540	940	1200	1180	500	7,06	7,0
ОПВ5-110	5,33	10,5	485	85	11	2540	1375	5540	940	1200	1180	1 000	7,475	9,9
ОПВ2-110	5	15	485	86	12	2540	1375	5540	940	1200	1180	1 000	7,592	9,9
ОПВ3-110	5,19	22	585	85	13	2540	1375	5540	940	1200	1180	1 600	7,7	11,9
ОПВ16-145	8,47	7,4	365	85	11,5	3450	1875	7740	1200	1580	1700	1 000	13,29	14,8
ОПВ5-145	9,3	10,5	365	85	11	3450	1875	7740	1200	1580	1700	1 600	13,43	16,7
ОПВ2-145	8,47	14,7	365	86	12	3450	1875	7740	1200	1580	1700	1 600	14,415	16,7
ОПВ10-145	9,3	17	365	86	12	3450	1875	7740	1200	1580	1700	2 500	15,22	21,3
ОПВ16-185	13,8	7,5	290	84	12	4080	3360	9525	2770	2020	2255	4 000	38,96	49,4

ОПВ2-185	13,8	15,2	290	86	13	4080	3360	9 525	2770	2020	2255	4 000	39,6	49,4
ОПВ10-185	15,9	18,6	290	86	15	4080	3360	9 525	2770	2020	2255	5 000	40,72	53,56
ОПВ11-185	18,9	18	333	86	15	4080	3360	9 525	2770	2020	2255	5 000	38,8	49,35
ОПВ10-260	32,5	19	214	86	14	5200	4000	12 900	2040	2850	3000	12 500	72,4	127,3
ОПВ11-260	34,5	15	214	86	13	5200	4000	12 900	2040	2850	3000	12 500	67,7	127,3
ОПВ20000-12	5,6	12,7	500	83	—	7200	2760	2 885	1380	2760	1405	1 000	16,0	—
ООПВ2500-4,2	0,7	4,2	750	75	—	2315	1050	1 200	525	1050	600	45	1,32	—
ОПВ19000-15	5,3	15,2	500	85	—	7200	2760	2 885	1380	2760	1405	1 000	16,0	—
Горизонтальный с поворотными лопастями														
ОПГ11-220	24	7,4	214	87	11,5	4320	5500	11 200	—	—	—	2 500	56,5	28,5

Примечание. Размеры и масса насосов ОВ5-47МБ, ОПВ20000-12, 1ООПВ2500-4,2 и ОПВ19000-15 даны с учетом встроенного электродвигателя; КПД агрегата дан с учетом потерь мощности в электродвигателе.

9.4. Технические характеристики вакуум-насосов

Марка насоса	Подача Q, м³/мин	Минимальный вакуум, %	Частота вращения n, мин$^{-1}$	Мощность электродвигателя, кВт	Ориентировочный расход воды, л/мин	Размеры агрегата, мм			Диаметр патрубка, мм		Масса насоса, кг
						длина	ширина	высота	входного	напорного	
КВН-4	0,4	80	1450	1,7	4	392	240	278	25	25	38
КВН-8	0,8	80	1450	2,8	5	417	240	278	25	25	42
ВВН-0,75	0,75	60	1450	2,2	3	445	240	295	25	25	50
ВВН-1,5	1,5	80	1450	4,0	10	682	450	938	50	50	163
ВВН-3	3,0	80	1450	7,5	12	1085	510	1102	65	65	380
РМК-1	1,5	90	1450	4,5	10	575	360	390	65	65	93
РМК-2	4,2	92	1450	10,0	20	575	360	390	65	65	109
РМК-3	11,5	97	960	29,0	60	1215	500	790	125	76	475
РМК-4	27,0	96	720	70,0	108	1645	680	1070	170	170	1028

9.5. Технические характеристики погружных электронасосов

Марка насоса	Подача Q, л/с ($м^3/ч$)	Напор H, м	Мощность двигателя, кВт	Частота вращения n, Гц ($мин^{-1}$)	КПД η, %	Напряжение, B	Ресурс до первого капитального ремонта, тыс. ч	Масса, кг
			Осевые					
ОМПВ 250-10,5	(250)	10,5	11	(3000)	60	380	12,5	300
ОМПВ 250-4,2	(250)	4,2	4	(3000)	60	380	12,5	310
ОМПВ 300-7	(300)	7,0	11	(3000)	60	380	12,5	310
ОМПВ 400-5,5	(400)	5,5	11	(3000)	60	380	12,5	310
ОПВ 2900-4,2	(2900)	5,0	55	(730)	75	380	17,5	1350
			Центробежные					
ЦМПВ 125-28	35 (125)	28	16	50	60	380	10	300
ЦМПВ 100-90	29 (100)	90	50	50	58	380	10	540
ЦМПВ 400-75	110 (400)	75	125	50	63	660	20	1000
ЦМПВ 400-90	110 (400)	90	160	50	68	380	10	1400
			Центробежные производства концерна «Сигма» ЧССР					
80GQMИ-250	45	80	45	50	67	660	20	770
80GQMИ-315	45	125	75	50	65	660	20	970
100GQMИ-256	70	80	75	50	72	660	20	970
100GQMИ-320	70	125	115	50	70	660	20	—
125GQMИ-265	110	80	115	50	73	660	20	1560
125GQMИ-315	110	125	180	50	73	660	20	—
150GQMИ-280	175	80	180	50	76	660	20	—
150GQMИ-330	175	125	270	50	75	660	20	2000

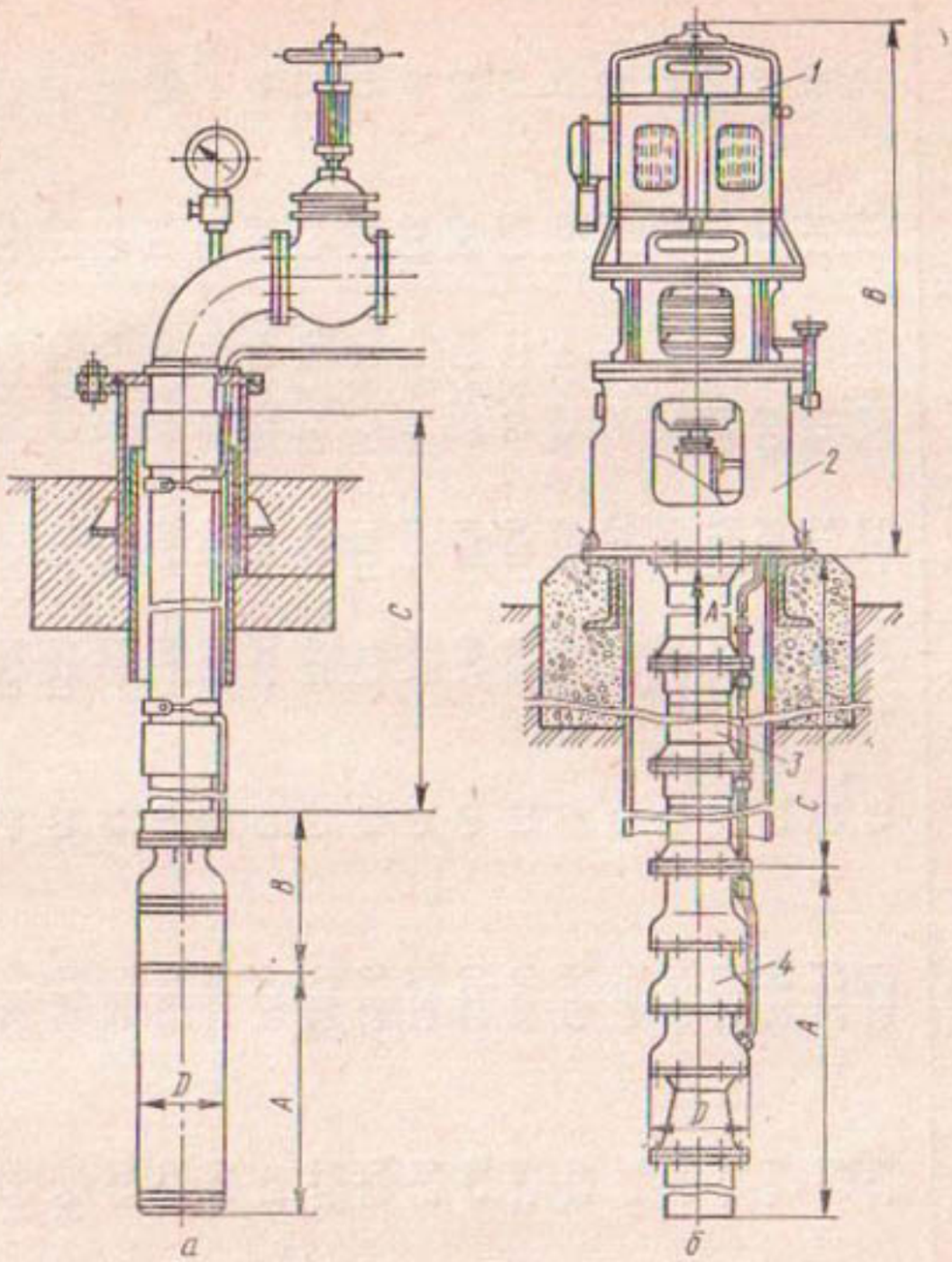


Рис. 9.5. Схема установки насосов для сельскохозяйственного водоснабжения:

а — типа ЭЦВ; *б* — типа А; *1* — электродвигатель; *2* — опорное устройство; *3* — водоподъемная труба; *4* — насос

каналов, что позволяет упростить технологическую схему работы станции, облегчает и сокращает сроки строительства, уменьшает площадь застройки узла сооружений. Особенно эффективно применение погружных электронасосов при водозаборе из источников с большими колебаниями уровней воды.

Осевые погружные электронасосы (табл. 9.5, рис. 9.4) устанавливают на оросительных системах для перекачки воды в открытые каналы и на осушительных системах, в том числе и польдерных — для сброса воды. *Центробежные погружные электронасосы* (см. табл. 9.5) используют на НС подачи воды в закрытые оросительные системы. Осевые погружные электронасосы марок ОПВ выпускают с сухими электродвигателями; насосы марок ОМПВ 250-10,5, ОМПВ 300-7, ОМПВ 400-5,5 и центробежные погружные всех марок — с водозаполненными двигателями.

Для подъема воды из скважин используют одно- или многоступенчатые центробежные насосы типов ЭЦВ, А и ЦТВ (табл. 9.6, рис. 9.5). У типа ЭЦВ насос и двигатель представляют собой единый моноблочный агрегат, опускаемый под уровень воды в скважине (см. рис. 9.5, *а*). Электроэнергию к погружному электродвигателю подводят через гибкий кабель. В насосах типа А

9.6. Технические характеристики центробежных насосов для подъема воды из скважин

Марка насоса	Подача Q, м³/с	Напор H, м	Мощность двигателя, кВт	Частота вращения n, мин⁻¹	КПД η, %	Размеры, мм				Масса агрегата, кг
						A	B	C	D	
ЭЦВ5-4-125	4	125	2,8	2850	45	825	1062	140×10³	114	75
ЭЦВ5-6,3-80	6,3	80	2,8	2850	55	825	815	90×10³	114	75
ЭЦВ6-4-130	4	130	2,8	2850	56	690	964	130×10³	145	80
ЭЦВ6-4-190	4	190	4,5	2850	57	740	1251	190×10³	145	100
ЭЦВ6-6,3-85	6,3	85	2,8	2850	68	690	744	85×10³	145	70
ЭЦВ6-6,3-125	6,3	125	4,5	2850	67	740	1170	126×10³	145	86
ЭЦВ6-6,3-60	6,3	60	2,8	2850	68	650	700	66×10³	145	70
ЭЦВ6-10-50	10	50	2,8	2850	65	690	656	50×10³	145	69
ЭЦВ6-10-80	10	80	4,5	2850	66	740	820	78×10³	145	82
ЭЦВ6-10-110	10	110	5,5	2850	65	780	920	110×10³	145	90
ЭЦВ6-10-140	10	140	8,0	2850	65	890	1060	140×10³	145	118
ЭЦВ6-10-185	10	185	8,0	2850	68	890	1384	185×10³	145	125
ЭЦВ6-10-235	10	235	11	2850	68	970	1714	235×10³	145	145
ЭЦВ6-16-50	16	50	4,5	2850	68	740	750	48×10³	145	77,5
ЭЦВ6-16-75	16	75	5,5	2850	70	780	920	72×10³	145	86
ЭЦВ6-16-110Г	16	110	8,0	2850	64	890	970	110×10³	145	201
ЭЦВ6-16-160ХТрГ	16	160	16	2850	62	1236	1442	160×10³	145	170
ЭЦВ6-25-140 ХГ	2,5	140	16	2850	62	1466	1825	134×10³	145	193
ЭЦВ8-16-140	16	140	11	2850	68	867	898	140×10³	186	148
ЭЦВ8-25-100	25	100	11	2850	72	897	935	100×10³	186	150
ЭЦВ8-25-150	25	150	16	2850	71	980	1121	150×10³	186	183
ЭЦВ8-40-300А	25	300	32	2900	68	1385	2570	325×10³	186	355

ЭЦВ8-40-60	40	60	11	2850	70	870	760	60×10^3	186	145
ЭЦВ8-40-90	40	90	16	2850	66	1106	875	90×10^3	186	240
ЭЦВ8-40-180	40	180	32	2900	68	1385	1720	180×10^3	186	302
ЭЦВ10-63-65	63	65	22	2900	70	975	643	65×10^3	235	207
ЭЦВ10-63-110	63	110	32	2900	71	1060	911	110×10^3	235	265
ЭЦВ10-63-150	63	150	45	2900	70	1230	1051	150×10^3	235	310
ЭЦВ10-63-180	63	180	45	2900	70	1230	1270	180×10^3	235	363
ЭЦВ10-63-270	63	270	65	2900	71	1685	1550	270×10^3	235	528
ЭЦВ10-120-60	120	60	32	2900	71	1330	820	65×10^3	235	345
ЭЦВ10-160-15Г	160	15	11	2850	60	1260	518	$13{,}5\times10^3$	235	148
ЭЦВ10-160-35Г	160	35	22	2950	76	1230	640	$31{,}5\times10^3$	235	264
ЭЦВ12-160-65	160	65	45	2920	70	1050	950	65×10^3	281	400
ЭЦВ12-160-100	160	100	65	2920	70	1100	1057	100×10^3	281	455
ЭЦВ12-210-25	210	25	22	2900	73	990	426	$22{,}5\times10^3$	281	237
ЭЦВ12-255-30Г	255	30	32	2900	72	1180	420	27×10^3	281	260
ЭЦВ12-375-30Г	375	30	45	2900	74	1245	510	27×10^3	281	275
ЭЦВ14-210-300Х	210	300	250	2950	75	2801	2494	300×10^3	330	1 782
ЭЦВ16-375-175Х	375	175	250	2950	81	2801	2440	174×10^3	358	1 655
ЭЦВ16-630-90	630	90	250	2920	77	2800	2070	90×10^3	320	1 500
20А-18×1	600	28	75	1450	65	2565	2410	$22{,}1\times10^3$	480	6 086
20А-18×3	600	85	250	1450	65	3165	2775	$77{,}3\times10^3$	480	16 715
24А-18×1	1200	45	250	1450	72	2685	2665	$38{,}2\times10^3$	580	12 000
ЦТВ8-40-65	40	65	11	1450	70	2640	1115	$65{,}3\times10^3$	185	2 000
ЦТВ10-100-80	1000	80	40	1450	70	3440	947	$80{,}3\times10^3$	250	3 510

двигатель установлен над скважиной, а мощность от него передают через вертикальный трансмиссионный вал, имеющий несколько опорных подшипников.

При выборе скважинных насосов необходимо учитывать значительные потери напора в водоподъемных трубах: для насосов типа ЭЦВ — 3...6%, типа А — 4...6% напора насоса.

9.2.3. СОВМЕСТНАЯ РАБОТА НАСОСОВ С СЕТЬЮ

Режим работы насоса, так называемую *рабочую точку*, определяют пересечением на едином графике (см. рис. 9.2) характеристики насоса $H—Q$ и характеристики сети или трубопровода $H_t—Q$ (где H_t — напор в трубопроводе, равный $H+h_{\Sigma w}$; H — высота подъема воды; $h_{\Sigma w}$ — суммарное гидравлическое сопротивление во всасывающем и напорном трубопроводах, $h_{\Sigma w}=kQ^2$. Коэффициент сопротивления k находят экспериментально или расчетом с помощью гидравлических справочников).

Режим работы насоса регулируют, изменяя характеристики сети или насоса. Первого достигают прикрытием задвижки на трубопроводе или перепуском воды через регулируемую задвижку из напорной магистрали во всасывающую. На практике этот способ применяют редко из-за дополнительных потерь напора на преодоление гидравлического сопротивления.

Характеристики насоса изменяют путем обточки рабочего колеса, изменения частоты его вращения или изменения угла установки рабочих лопастей. Новые параметры насоса для первых двух способов определяют пересчетом по формулам таблицы 9.7. Соответствующая им характеристика насоса будет проходить через заданную точку B (H_p, Q_p) (см. рис. 9.2).

9.7. Формулы для определения новых параметров насоса

Исходные параметры	При обточке рабочего колеса		При изменении частоты вращения
	$n_s<200$	$n_s>200$	
Частота вращения	$n_1=n$	$n_1=n$	$n_2=ni$
Диаметр рабочего колеса D	$D_1=Di$	$D_1=Di^{0,66}$	$D_2=D$
Подача Q	$Q_1=Qi$	$Q_1=Qi^{1,5}$	$Q_2=Qi$
Напор H	$H_1=Hi^2$	$H_1=Hi^3$	$H_2=Hi^2$
Мощность N	$N_1=Ni^3$	$N_1=Ni^{4/5}$	$N_2=Ni^3$
Кавитационный запас			$\Delta n_2=\Delta hi^2$

Примечание. Параметр пересчета $i=D_1/D$ в первом случае и $i=n_2/n$ во втором определяют отношением $i=Q_p/Q_c$ (где Q_p — требуемая расчетная подача насоса; Q_c — подача насоса до изменения его характеристик, соответствующая точке C пересечения первоначальной характеристики насоса $H—Q$ с параболой $H=kQ^2$, проходящей через точку B с заданными H_p, Q_p, то есть при $k=H_p/Q_p^2$, см. рис. 9.2).

У центробежных насосов обтачивают рабочее колесо, кавитационные характеристики при этом не меняются. Наиболее экономичный способ регулирования режима работы осевых и диагональных насосов — изменение угла установки рабочих лопастей (рис. 9.6).

При обточке рабочего колеса насоса меняется его КПД. У насоса с $n_s=60...120$ на каждые 10% обточки по наружному диаметру колеса КПД насоса снижается на 1%, а у насосов с $n_s>120$ на каждые 4% обточки — на 1%. В связи с этим допускаемая степень обточки рабочего колеса центробежных насосов имеет следующие пределы:

коэффициент быстроходности n_s	60...120	120...200	200...300
допускаемая степень обточки рабочего колеса, %	20...15	15...10	10...5

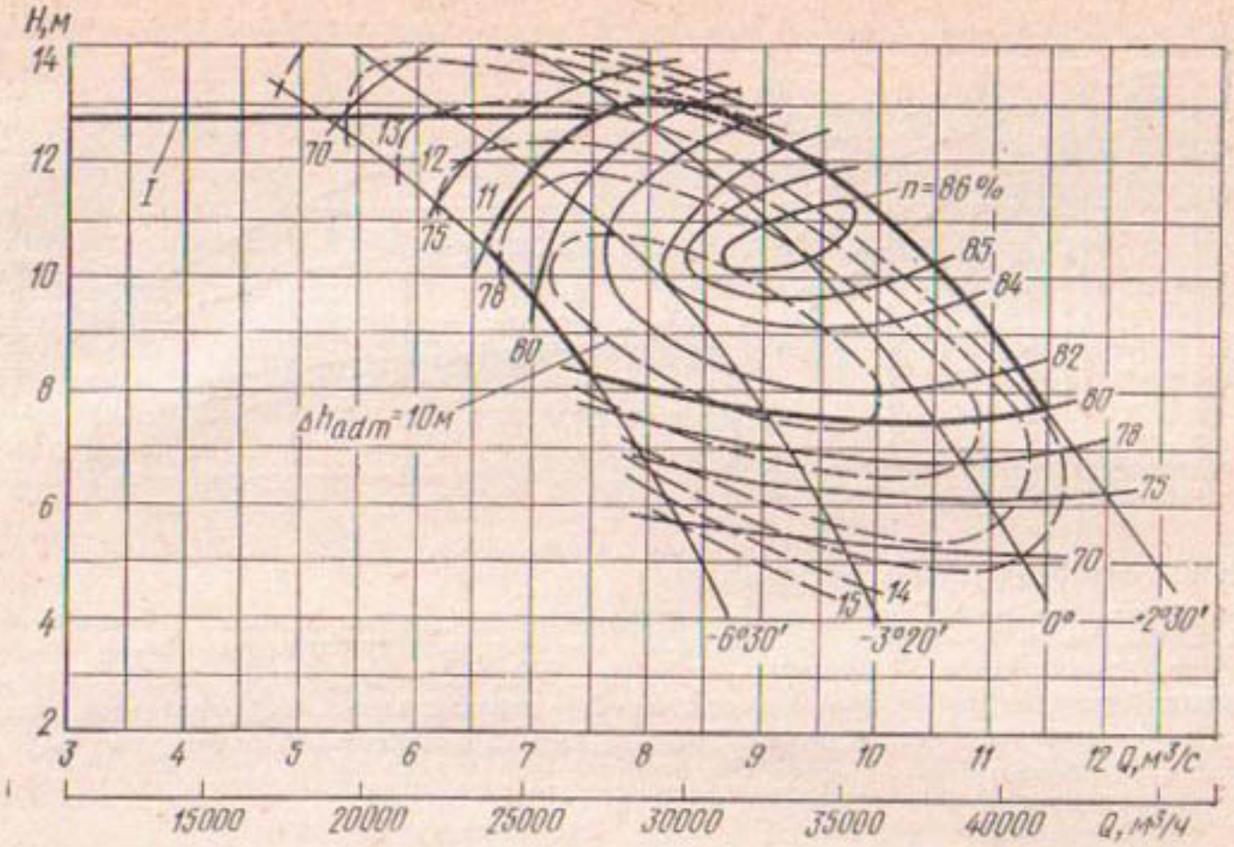


Рис. 9.6. Характеристики осевого насоса при различных углах разворота лопастей

КПД насоса меняется и при значительном изменении частоты вращения. Электродвигатели насосов имеют ограниченную номенклатуру частот вращения, приведенную ниже, мин$^{-1}$:

синхронные электродвигатели	3000	1500	1000	750	600	500	375	300	250	214
асинхронные электродвигатели	2900	1450	970	730	585	485	367	290	—	—

На практике плавное изменение частоты вращения требует довольно сложного и дорогого оборудования.

Возможно комбинированное регулирование режима работы насоса: изменением частоты вращения с последующей обточкой рабочего колеса центробежного насоса или изменением угла установки лопасти осевого (диагонального) насоса.

При параллельной работе нескольких насосов на один трубопровод суммарную характеристику системы H_Σ—Q определяют сложением подач отдельных насосов Q_i при одном и том же произвольном напоре H. Суммарную подачу воды Q_A дает точка пересечения H_Σ—Q с характеристикой трубопроводной системы H_i—Q (рис. 9.7, *а*, при работе трех насосов $\Sigma=1+2+3$). По мере увеличения числа работающих насосов подача каждого насоса (рис. 9.7, *а*) в отдельности уменьшается (точки A_1', A_2', A_3' и A_1'', A_2'', A_3'' — рабочие точки отдельных насосов при двух и трех одновременно включенных насосах).

При последовательной работе насосов на один трубопровод все насосы имеют одинаковую подачу. Вода поочередно проходит через каждый насос. Суммарную характеристику работающих насосов H_Σ—Q находят, сложив их напоры H_i при постоянной подаче Q. Точка пересечения H_Σ—Q с характеристикой трубопроводной системы H_i—Q определяет суммарную подачу системы насосов (рис. 9.7, *б*, при $Q \leqslant Q_A$ включены два насоса: $\Sigma=1+2$, при $Q \leqslant Q_B$ работает три насоса: $\Sigma=1+2+3$).

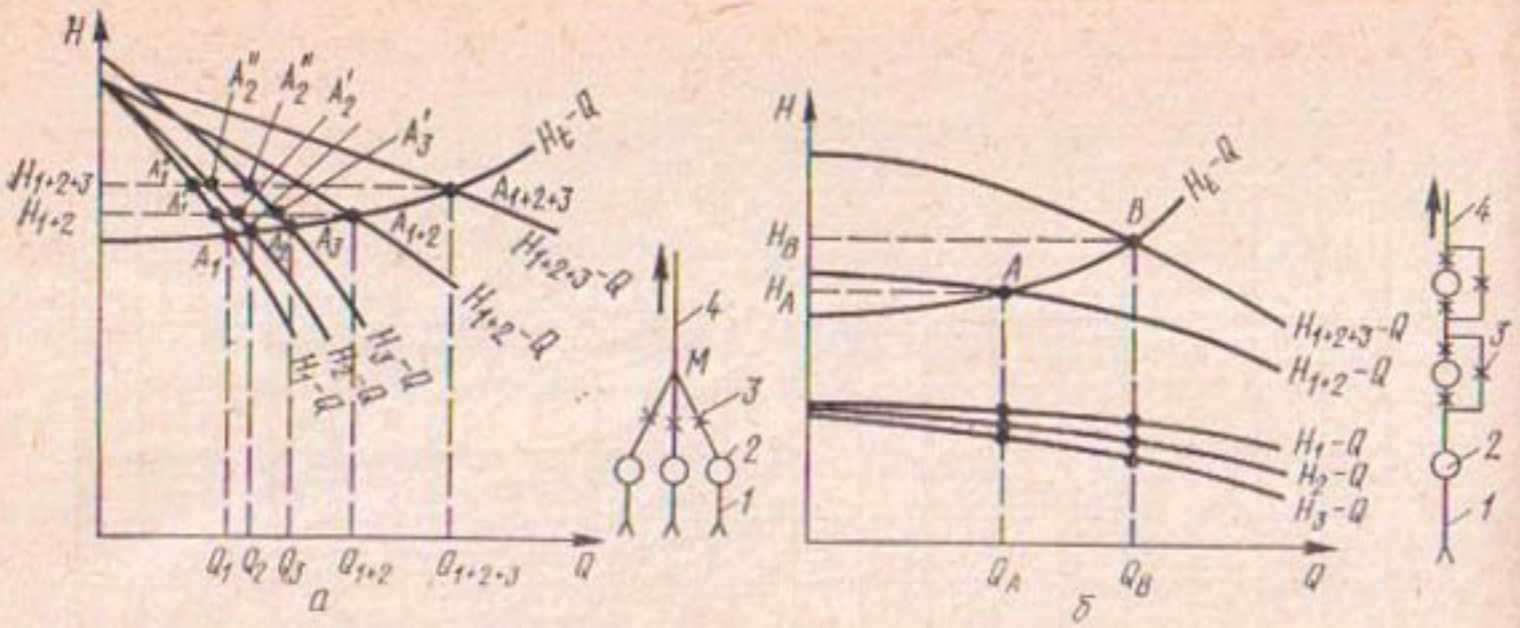


Рис. 9.7. Работа НС и трубопровода:

а — параллельная работа насосов; *б* — последовательная работа насосов; *1* — всасывающий трубопровод; *2* — насос; *3* — задвижка; *4* — напорный трубопровод; H_1—Q, H_2—Q, H_3—Q — характеристики отдельных насосов; H_{1+2}—Q, H_{1+2+3}—Q — характеристики совместной работы двух и трех насосов; H_l—Q — характеристика трубопроводной системы; A_1, B — рабочие точки отдельного насоса при самостоятельной работе, при работе двух и трех насосов

9.2.4. ПОДБОР НАСОСНЫХ АГРЕГАТОВ

Расчетную подачу каждого насоса Q_p определяют по графику водопотребления, который перестраивают в ступенчатый график водоподачи в соответствии с выбранным числом насосов при сохранении общего объема подаваемой воды за сезон.

Расчетный напор насосов H_p предварительно определяют по формуле

$$H_p = H_m + h_l + h_m, \qquad (9.8)$$

где H_m — средневзвешенная высота подъема воды, $H_m = \Sigma Q_i H_i T_i / \Sigma Q_i T_i$, Q_i, H_i — подача НС и высота подъема воды в период работы T_i; h_l — удельные потери напора по длине трубопровода, для НС с максимальной подачей до 3 м³/с h_l ориентировочно составляют 4 м на 1 км, с подачей 3...10—3...3,5; более 10 м³/с — 2,5...3 м на 1 км; h_m — суммарные местные потери, для предварительных расчетов h_m=0,7...1,2 м при использовании осевых насосов и 1...1,5 м — центробежных. После выбора насосного оборудования, схемы коммуникаций, арматуры, размеров трубопроводов гидравлическим расчетом определяют фактические h_l и h_m, а по их значениям уточняют H_p.

Расчетные напоры насосов H_p для НС дождевальных систем определяют по формуле

$$H_p = H_{max} + h_l + h_m + H_{дм}, \qquad (9.9)$$

где H_{max} — максимальная высота подъема воды от источника до гидранта с минимальным свободным напором при любых комбинациях работы дождевальных машин на орошаемом участке; h_m и h_l — потери на местные сопротивления и по длине трубопровода от источника до гидранта; $H_{дм}$ — свободный напор в гидранте, требуемый для работы дождевальной машины.

По расчетным значениям H_p и Q_p выбирают тип и марку насоса с учетом технических характеристик наиболее часто применяемых в мелиорации насосов (см. табл. 9.2...9.5) для режима их работы с КПД, близким к максимальным.

На оросительных НС обычно применяют однотипные насосы с одинаковым Q_p. Число агрегатов, как правило, принимают: при подаче НС до

1 м³/с — 2...4 насоса; при подаче 1...5 — 3...5, при подаче 5...30 — 4...6, при подаче более 30 м³/с — 5...9 насосов.

Число рабочих агрегатов увеличивают при установке в одном здании нескольких групп насосов с разными напорами, а также при отсутствии освоенного оборудования. Уменьшают число агрегатов при подаче воды в открытые водоемы, имеющие регулирующие емкости, с вместимостью достаточной при остановке насосов на одни сутки. По одному насосу устанавливают на шахтных колодцах и скважинах, на оросительных НС III категории надежности с подачей до 400 л/с.

На станции предусматривают резервные насосы с той же расчетной подачей, рекомендуемое число которых в зависимости от категории надежности НС и числа рабочих насосов приведена ниже.

Категория надежности подачи	Число рабочих насосов	Число резервных насосов
I	1...6	1
	1...9	2
II	Любое	1
III	»	Не предусматривают

Для осушительных НС число насосов зависит от объема регулирующей емкости. Чем бóльше объем регулирующей емкости, тем меньше число насосов может быть установлено в НС. При ее отсутствии устанавливают разнотипные насосы с соотношениями расчетных подач 1 : 1 : 2; 1 : 2 : 2; 1 : 1 : : 2 : 2; 1 : 1 : 3 : 3. При этом резервные насосы не предусматривают, если НС работает с максимальной подачей не более 10 сут и нет опасности катастрофических последствий при выходе из строя одного из насосов.

На НС подкачки, обслуживающих одну-две дождевальные машины устанавливают один насосный агрегат.

На стационарных НС, обслуживающих один или несколько севооборотных участков, предусматривают 3...5 рабочих насосных агрегатов, резервные агрегаты не устанавливают.

В технологической схеме предусматривают пуск основных агрегатов на обратные клапаны. При этом закрытая трубопроводная сеть должна быть заполнена водой и из повышенных точек трубопроводов удален воздух. Кроме основных насосных агрегатов, устанавливают бустерные насосы — не менее двух, поддерживающие давление в закрытой сети и компенсирующие утечки воды из нее в период прекращения водозабора дождевальными машинами. Давление должно обеспечивать импульс на запуск первого основного агрегата при включении одной из дождевальных машин.

Марки насосов и их число на подкачивающих станциях закрытых оросительных систем с дождевальными машинами выбирают с учетом следующих особенностей:

режим работы оросительных систем с дождевальными машинами, работающими в движении, характеризуется малой частотой их переключения;

для систем с машинами позиционного действия характерно частое переключение дождевальных машин и малая продолжительность работы с неизменным числом машин, что требует большего числа насосных агрегатов и дополнительных устройств, обеспечивающих последовательность пуска и остановки агрегатов. При установке на станции крупных насосов для избежания непроизводительного расхода электроэнергии целесообразно устанавливать и разменные насосные агрегаты с подачей 20...30% подачи основного агрегата. Для снижения величины гидравлического удара в напорном трубопроводе при остановке одного или всех основных насосов, а также для кратковременного увеличения подачи воды в сеть во время пуска основного насоса предусматривают установку водовоздушных резервуаров (ВВК), оборудованных предохранительными и запорными клапанами, мерными стеклами, сигнализаторами уровня и т. д. При подаче НС до 500 л/с обычно предусматривают один ВВК емкостью 10 м³, а при подаче более 500 л/с — два ВВК емкостью до 10 м³.

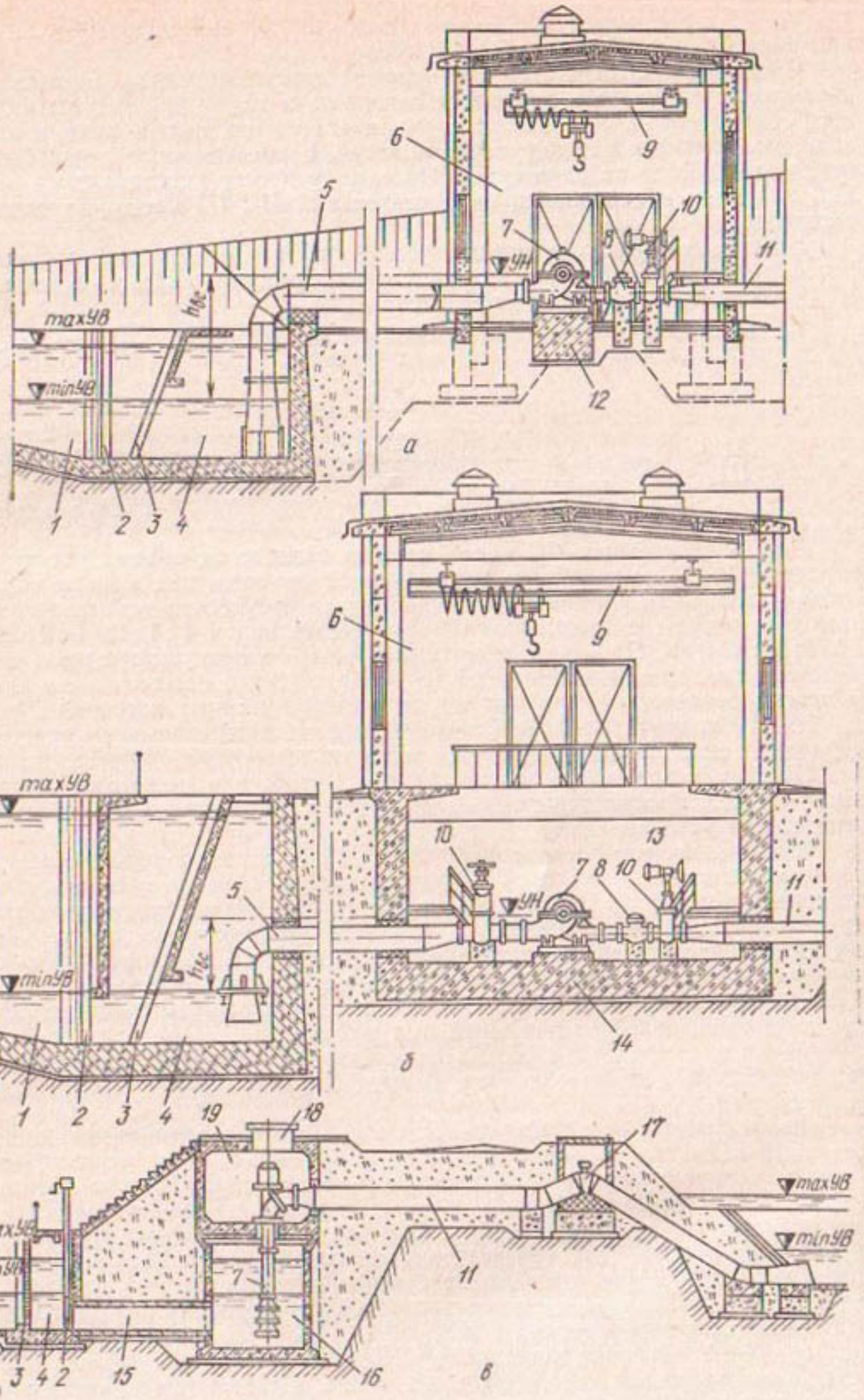


Рис. 9.8. Здания НС раздельного типа:

а — наземное; *б* — камерное с сухим насосным помещением; *в* — то же с «мокрой» камерой; *1* — аванкамера; *2* — паз ремонтного затвора; *3* — сороудерживающая решетка; *4* — водоприемная камера; *5* — всасывающая труба насоса; *6* — здание станции; *7* — насос; *8* — обратный клапан; *9* — кран-балка; *10* — задвижка; *11, 15* — напорный и самотечный трубопроводы; *12* — фундамент насоса; *13* — камера для размещения насосов; *14* — фундаментная плита; *16* — «мокрая» камера; *17* — сифон; *18* — монтажный люк; *19* — машинный зал

9.3. КОНСТРУКЦИИ И КОМПОНОВКА НС

9.3.1. СТАЦИОНАРНЫЕ НС

Гидроузел стационарной НС включает водозаборное сооружение, подводящий канал или закрытый трубопровод, аванкамеру и сооружения, сопрягающие ее со зданием НС, здание НС с трансформаторной подстанцией, напорный трубопровод. По конструктивному исполнению различают совмещенный и раздельный тип.

При совмещенном варианте водозаборное устройство и здание станции объединены в единой конструкции, при раздельном — водозаборное устройство выполнено отдельно стоящим и соединено со зданием НС самотечными или всасывающими трубопроводами.

Раздельную компоновку обычно применяют для станций с горизонтальными центробежными насосами (рис. 9.8), совмещенная более удобна для вертикальных насосов (рис. 9.9).

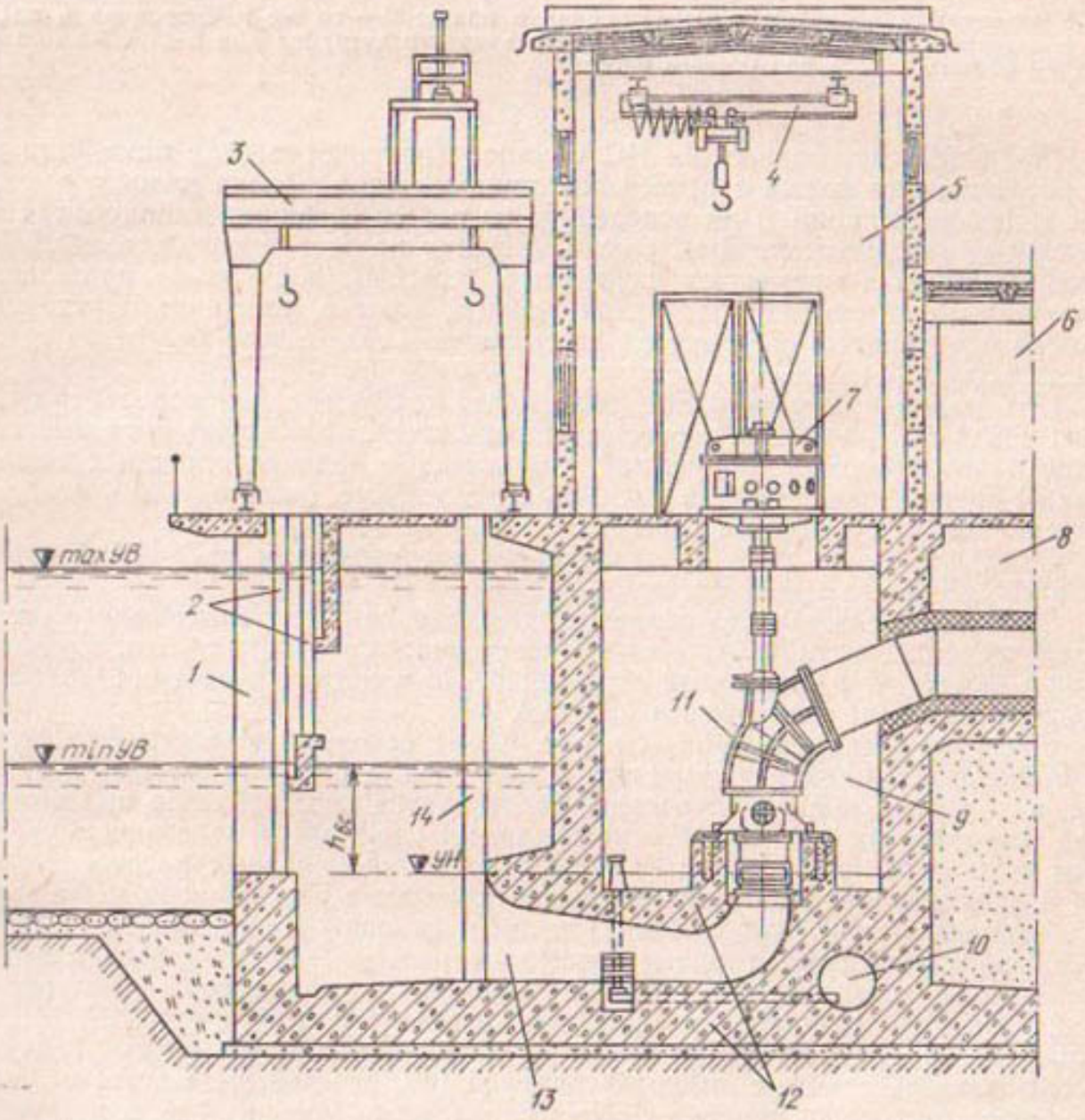


Рис. 9.9. Здание совмещенной НС блочного типа с насосами ОПВ:

1 — водоприемная камера; *2* — пазы сороудерживающих решеток и ремонтных затворов; *3* — козловый кран; *4* — кран-балка; *5* — машинный зал; *6* — распределительное устройство; *7* — электродвигатель; *8* — кабельный полуэтаж; *9* — насосное помещение; *10* — сборная дренажная галерея; *11* — насос; *12* — массивный железобетонный блок; *13* — всасывающая труба; *14* — паз рабочего затвора

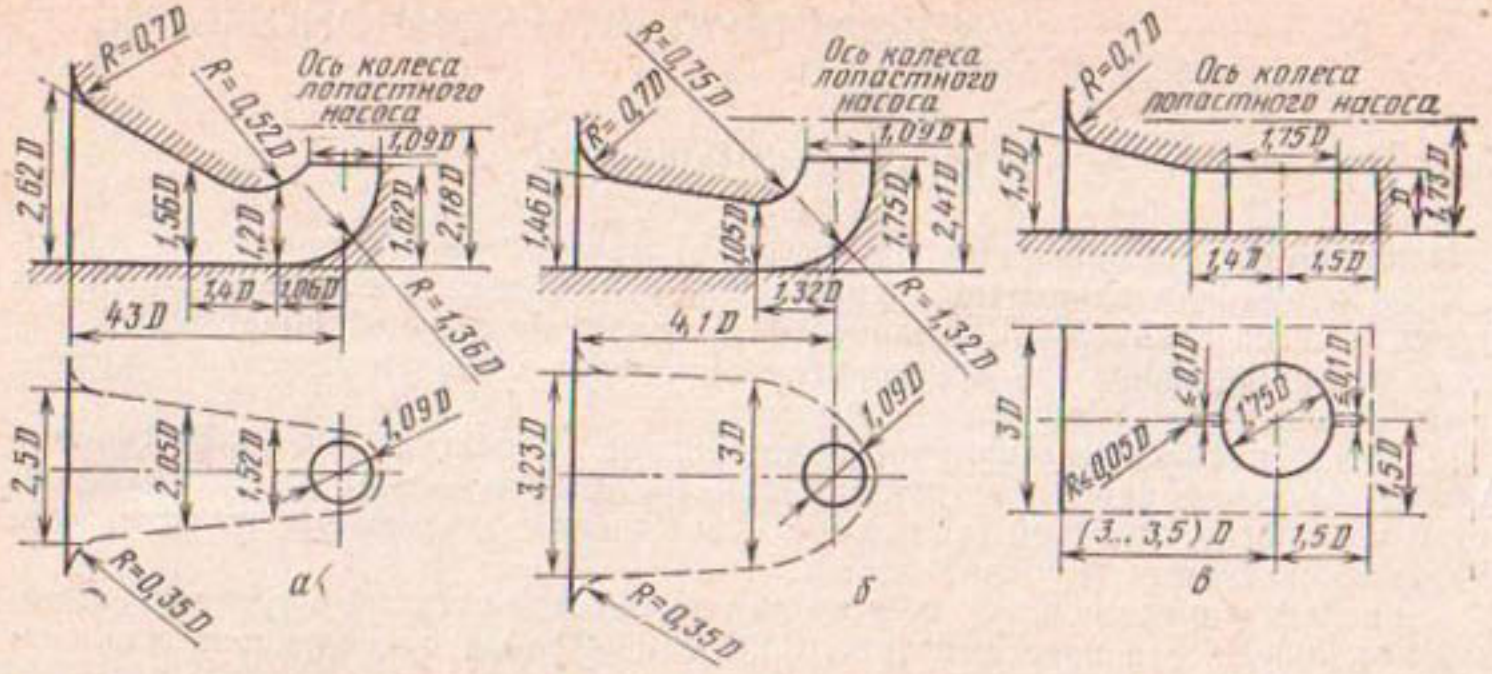


Рис. 9.10. Всасывающие трубы насосов:

а — с коленчатым подводом воды, суженная в плане; *б* — то же расширенная в плане; *в* — с камерным подводом воды; *D* — диаметр входного патрубка для центробежного насоса и рабочего колеса для осевого насоса

Водозаборные сооружения НС обычно выполняют в виде камерного водоприемника или ковша с откосными стенками (при обилии наносов и сильном шугообразовании). При водозаборе из рек со средними амплитудами колебаний уровня воды до 8 м и использовании насосов с положительной высотой всасывания применяют чаще всего береговое сооружение раздельного типа, при значительных колебаниях уровней воды в источнике и установке насосов с отрицательной высотой всасывания — сооружение береговое совмещенного типа (см. рис. 9.9).

При пологих берегах и дне реки, когда требуемые для водозабора глубины находятся на большом расстоянии от берега, используют русловые компоновки водозаборных сооружений, совмещенные (здание станции с водозаборным сооружением в русле реки) или раздельные (водозаборный оголовок в русле, здание станции на берегу).

Стеснение русла реки водозаборными сооружениями не должно превышать 15...20% его живого сечения.

Здания НС служат для размещения основного и вспомогательного гидромеханического, электротехнического и механического оборудования, трубопроводной арматуры и служебных помещений. По конструктивным признакам их делят на наземные, камерные и блочные.

В здании наземного типа (см. рис. 9.8, *а*) основные агрегаты размещают на отдельно стоящих фундаментах, а пол здания располагают выше максимального уровня воды в источнике. Такое здание целесообразно при водозаборе из открытых источников с устойчивыми берегами и колебанием уровня воды в пределах допустимой высоты всасывания основных насосов.

В зданиях камерного типа насосное помещение расположено ниже уровня земли (полностью или частично) и имеет сплошную фундаментную плиту, на которой размещены основные насосные агрегаты. В зданиях заглубленного типа насосы устанавливают ниже минимального уровня воды в источнике (под заливом), что упрощает пуск насосов, или выше него (рис. 9.8, *б*), что сокращает глубину дорогостоящей подземной части. Одной из их разновидностей является здание с «мокрой» камерой (см. рис. 9.8, *в*), в котором рабочие колеса насосов размещают ниже минимального уровня воды в источнике, а верхние подшипники насосов и междуэтажное перекрытие — выше максимальных уровней водоисточника.

Здания блочного типа (см. рис. 9.9) имеют в основании массивный железобетонный блок, в котором размещены всасывающие трубы основных насосов. Стандартные формы и размеры труб показаны на рисунке 9.10. Трубы с коленчатым подводом воды рекомендуют для центробежных и осевых на-

9.8. **Условия применения НС**

Факторы	Стационарных				Передвижных		
	наземных	камерных		блочных	плавучих	наземных	фуникулерных
		с сухой камерой	с мокрой камерой				
Основной насос	Центробежный или осевой горизонтального исполнения с подачей менее 2 м³/с	Центробежный или осевой горизонтального исполнения любой подачи, центробежный вертикального исполнения типа В с подачей до 4 м³/с	Осевой вертикального исполнения с подачей менее 2 м³/с, диагональный, реже центробежный	Осевой или центробежный вертикального исполнения с подачей более 2 м³/с, крупный осевой горизонтального исполнения с подводом воды по изогнутым всасывающим трубам	Центробежный или осевой горизонтального исполнения	Центробежный или осевой горизонтального исполнения	Центробежный горизонтального исполнения
Колебания уровней воды в водоисточнике	В пределах допускаемой высоты всасывания	В пределах допускаемой высоты всасывания	В пределах габаритов насосов и размера камеры	Любые	Любые, преимущественно более 5 м	В пределах допускаемой высоты всасывания	Любые более допускаемой высоты всасывания
Тип водозаборного сооружения	Стационарное ковшового типа при подаче насоса менее 0,3 м³/с или камерного типа при подаче насоса более 0,3 м³/с	Стационарное камерного типа совмещенной или раздельной компоновки со зданием НС	Стационарное камерного типа совмещенной или раздельной компоновки со зданием НС	Стационарное камерного типа совмещенной или раздельной компоновки со зданием НС	Подвижное	Подвижное	Подвижное

сосов большой подачи (рис. 9.10, *а, б*), с камерным подводом (рис. 9.10, *в*) — при относительно небольших диаметрах колеса осевых насосов (до 1 м), что упрощает изготовление опалубки при бетонировании блока НС.

Выбор типа здания НС зависит от ряда факторов (табл. 9.8) и определяется технико-экономическим расчетом.

9.3.2. ПЕРЕДВИЖНЫЕ НС

Передвижная НС или установка предназначены для работы на затапливаемых поймах рек, для орошения на локальных участках (до 500 га), при агрегатировании с комплектами оборудования для орошения или наполнения водоемов. Состоит из насоса и оборудования, обеспечивающего перемещение и работу станции без специального здания и гидротехнических сооружений. Передвижные НС выпускают серийно. Они нашли широкое применение в мелиорации благодаря быстроте установки и перемещения при изменении уровней в источнике или обслуживании нескольких объектов.

По конструкции передвижные установки бывают *наземного типа*, смонтированные на колесных шасси (рис. 9.11, *а*) или салазках; *фуникулерные*, смонтированные на платформе и перемещаемые по рельсовым путям (рис. 9.11, *б*), и плавучие, смонтированные на понтоне или других плавучих средствах и удерживаемые в створе сооружения (рис. 9.11, *в*).

Выпускают передвижные наземные станции высоконапорные (напор 110...40 м), средненапорные (16...48 м) и низконапорные (5...26 м) (табл. 9.9...9.11). Фуникулерные станции применяли для подачи воды до 500 л/с, с появлением погружных насосов они потеряли свое значение. Плавучие НС выпускают с подачей от 0,1 до 1,4 м³/с и напором от 7,5 до 38 м (табл. 9.12).

9.4. НС ЗАКРЫТЫХ ОРОСИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ С ДОЖДЕВАЛЬНЫМИ МАШИНАМИ

9.4.1. СТАЦИОНАРНЫЕ НС ДЛЯ ЗАКРЫТЫХ ОРОСИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ С ДМ

Подкачивающие НС, или станции подкачки, предназначены для подачи воды в закрытые оросительные системы с широкозахватными ДМ. Как и обычные, станции машинного водоподъема бывают стационарными и передвижными. *Стационарные НС* строят со зданиями из сборных железобетонных деталей (табл. 9.13, 9.14, рис. 9.12) и в блочно-комплектном исполнении заводского изготовления (БКНС) (см. п. 9.4.2).

Технология работы стационарных НС: первоначальный пуск вручную — автоматическое включение вакуумной установки — отсос воздуха из всасывающих коммуникаций и корпусов насосов — пуск бустерного (вспомогательного) насоса — открытие задвижки и заполнение водой оросительной сети — при давлении в сети, близком к расчетному, открытие задвижки за напорными патрубками рабочих насосов — закрытая оросительная сеть готова к работе.

При переводе на автоматический режим станция обеспечивает подачу воды в зависимости от числа работающих ДМ на сети. В поливной период при неработающих ДМ давление и потери (утечки) воды из закрытой сети восполняют бустерные насосы, которые включаются при падении давления в сети и отключаются при его увеличении от импульсов датчиков давления (электроконтактных манометров).

При включении ДМ давление в сети падает; от электроконтактного манометра включается в работу первый рабочий (основной) насос, а бустерный — отключается. С увеличением числа одновременно работающих ДМ по сигналу

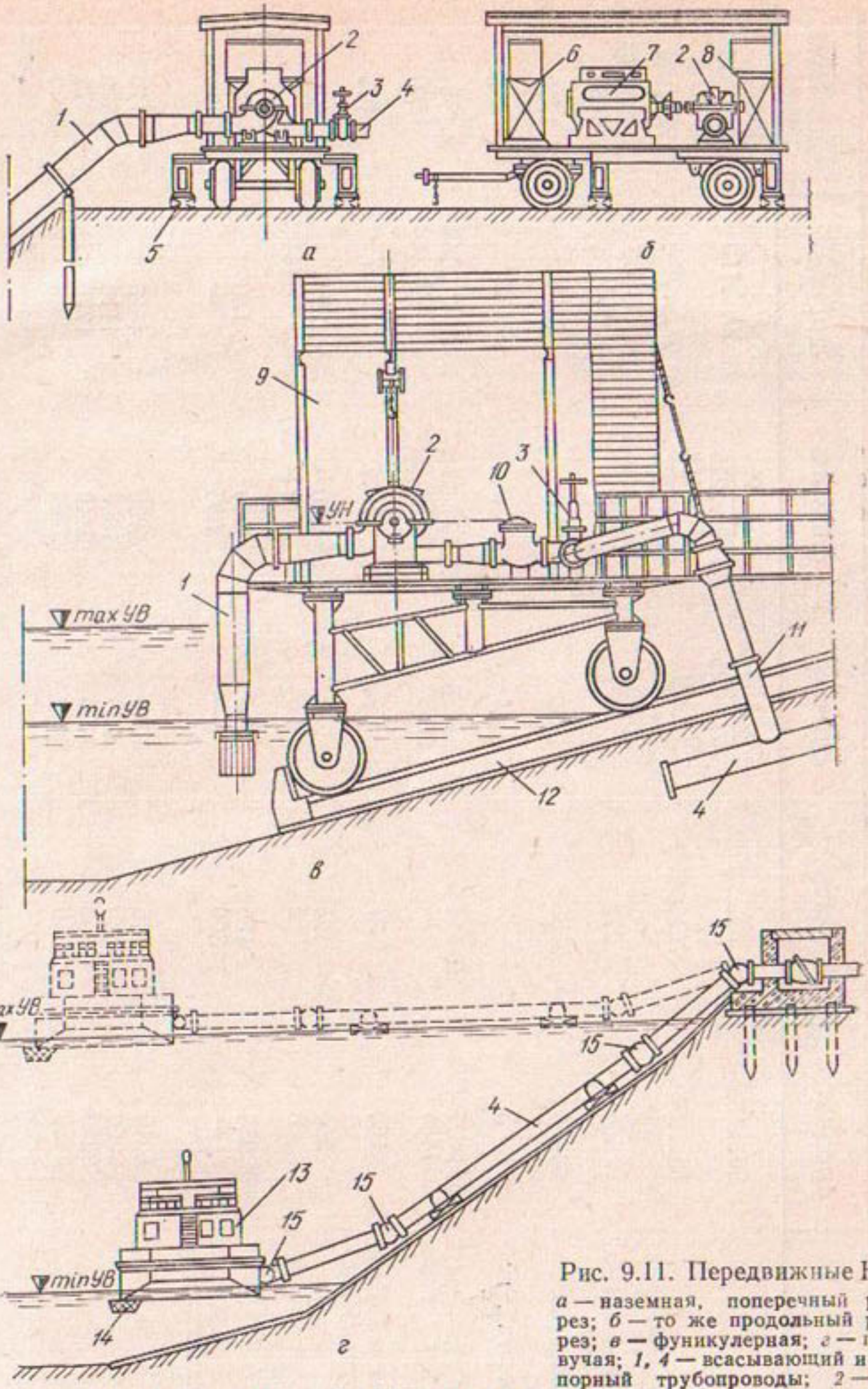


Рис. 9.11. Передвижные НС:
а — наземная, поперечный разрез; *б* — то же продольный разрез; *в* — фуникулерная; *г* — плавучая; *1, 4* — всасывающий и напорный трубопроводы; *2* — насос; *3* — задвижка; *5* — аутриггеры; *6* — баки для топлива и масла; *7* — дизель; *8* — бак для воды; *9* — передвижная тележка; *10* — обратный клапан; *11* — стояк для присоединения напорной линии насоса; *12* — рельсы; *13* — понтон; *14* — рыбозаградитель; *15* — шаровое соединение

9.9. Технические характеристики высоконапорных передвижных НС

Характеристика	СНПЭ-100/100	СНП-25/60А	СНП-50/80	СНП-75/100	СНП-100/80	ДНУ-120/70
Подача, л/с	90...135	20,5...38	30...50 / 70...125	60...95 / 175...225	50...110	120...144
Напор, м	85...98	75...45	80...87 / 30...42	95...113 / 35...50	97...78	78...60
Марка насоса	8К-6	4К-90/85	8М-9×2	Специальный	Д 320-50	Д 500-65
Диаметр рабочего колеса, мм	545	272	—	368	405	465
Частота вращения вала насоса, мин $^{-1}$	1485	2650	1750	1700	1850	1500
Допускаемая высота всасывания, м	3	3	4	3,5	3	5
Марка двигателя	АО3-315-4У3	Д-144-66	А-41Б	ЯМЗ-238 Г	ЯАЗ-М-206А	К-272/М1
Частота вращения вала, мин$^{-1}$	1485	—	1750	1700	2000	1500
Мощность двигателя, кВт	160	37	66,2	118,7	118,7	125
Всасывающий трубопровод:						
диаметр, мм	250	125	200	200	200	250
длина, м	6	5	5	8 (4×2)	8 (4×2)	8
Напорный трубопровод:						
диаметр, мм	200	180	250	250	180	150
длина, м	—	300	—	300	—	—
Размеры в транспортном положении, мм:						
длина	5240	3210	4200	5790	4885	5170
ширина	2260	1930	2200	1890	1116	1630
высота	3220	2150	2400	2440	1770	1870
Масса, кг	2430	1310	2680	3700	2560	3100
Система передвижения	Рама-салазки	Одноосный прицеп	Одноосный прицеп	Двухосный прицеп	Рама-салазки	Рама-салазки

Примечание. СНП — станция насосная передвижная; СНПЭ — станция насосная передвижная электрифицированная; ДНУ — дизель-насосная установка; для НС СНП-75/100 и СНП-50/80 напор и подача в числителе — в режиме последовательной работы, в знаменателе — параллельной.

9.10. Технические характеристики средненапорных передвижных НС

Характеристика	СНП-50/40	СНП-120/30	СНПЭ-120/30	СНП-240/30	СНПЭ-240/30
Подача, л/с	40...70	80...175	90...160	160...340	170...360
Напор, м	37...42	23...39	23...32	18...28	21...33
Марка насоса	Д320-50	9К-14	9К-14	14К-13	14К-13
Диаметр рабочего колеса, мм	405	300	320	422	484
Частота вращения вала насоса, мин$^{-1}$	1300	1750	1480	1100	985
Допускаемая высота всасывания, м	3	3	3	3	3
Марка двигателя	Д-54А	А-41Б	АО2-82-4М201	А-01М	АО3-315-6М201
Частота вращения вала, мин$^{-1}$	1300	1750	1480	1750	1500
Мощность двигателя, кВт	39,7	65,2	55	95,1	110
Всасывающий трубопровод:					
диаметр, мм	200	250	250	350	350
длина, м	8	6	6	6	6
Напорный трубопровод:					
диаметр, мм	180	250	250	350	350
длина, м	300	300	300	300	300
Размеры в транспортном положении, мм:					
длина	3007	5800	6300	6100	6500
ширина	1275	2640	2650	3300	3100
высота	2050	3200	3200	3700	3600
Масса, кг	2300	2600	2400	3360	3485
Система передвижения	Рама-салазки	Одноосный прицеп	Рама-салазки	Одноосный прицеп	Рама-салазки

9.11. Технические характеристики низконапорных передвижных НС

Характеристика	СНП-150/5А	СНП-250/18М	СНП-300/7	СНП-500/10	СНПЭ-300/7	СНПЭ-500/10
Подача, л/с	170...260	172...250	240...330	545...705	280...340	470...860
Напор, м	7,5...5,5	24...18	9...5	11...5,7	8..5	10,6...6,5
Марка насоса	08-25Г	12Д-19-60	ОГ-5-30-02	ПГ-50	ОГ-5-30-01	ПГ-50Б
Диаметр рабочего колеса, мм	250	300	300	500	300	500
Частота вращения вала насоса, $мин^{-1}$	1600	1450	1450	930	1475	985
Допускаемая высота всасывания, м	1,5	3...5,5	2,5	2,7...3,4	2,5	2,1
Марка двигателя	Д-37Е-С3-1	А-01М	Д-144	А-01М	4А200-4У3	АО3-315S-6У3
Частота вращения вала, $мин^{-1}$	1600	1750		1750		
Мощность двигателя, кВт	29,4	95,1	44,13	95,0	45	110
Всасывающий трубопровод:						
диаметр, мм	255	350	330	500	430	500
длина, м	4	6		9		6
Напорный трубопровод:						
диаметр, мм	300	350	330	500	430	500
длина, м	50	50	50	20	50	20
Размеры в транспортном положении, мм:						
длина	3286	3500	3670	4200	3520	3470
ширина	2075	1300	3180	1500	1440	1530
высота	3500	2200	3410	2120	1450	1485
Масса, кг	1500	3800	1720	5525	2270	4720
Система передвижения	Одноосный прицеп	Рама-салазки	Одноосный прицеп	Рама-салазки	Рама-салазки	Рама-салазки

9.12. Технические характеристики плавучих НС

Характеристика	НАП-1,1М	СНПл-240/30	СНПл-120/30	СНПл-500/10	СНПлэ-500/10
Подача, л/с	780...1350	200...322	80...175	540...650	510...664
Напор, м	13,5...17,5	17...26	23...38	7,65...10,2	7,5...9,6
Марка насоса	Д2500-17×2	14К-13	9К-14	ПГ-50	ПГ-50
Диаметр рабочего колеса, мм	550	422	300	500	500
Частота вращения вала, мин$^{-1}$	750	1100	1750	1000	985
Высота всасывания, м	4	3	3	4	—
Двигатель	2×3Д-6Н-235	А-01МБ	А-41Б	А-01М	АО3-315S-6У3
Мощность двигателя, кВт	173	95	65,2	95,5	110
Диаметр трубопровода, мм:					
всасывающего	500	250	500	500	500
напорного		350	250	500	500
Размеры в транспортном положении, мм:					
длина	17 600	7400	7400	7 500	7 400
ширина	6 700	3710	3710	3 110	3 100
высота	7 600	3380	3380	3 350	1 200
Масса, кг	40 000	5380	4500	10 120	10 930
Осадка понтона, м	0,65	0,63	0,55	0,76	0,77

Примечание. СНПл — плавучая НС, СНПлэ — плавучая электрифицированная НС, НАП — насосный агрегат плавучий.

9.13. Техническая характеристика НС для закрытых оросительных систем

Подача, л/с	Напор, м	Марка основных насосов	Марка электродвигателя и его мощность, кВт	Число агрегатов	Установленная мощность, кВт
		Проекты Союзгипроводхоза			
660	59,5	Д800-57 (12Д-9)	АО3-315М-4 (200)	3	600
880	59,5			4	800
1100	59,5			5	1000
525	91,5	Д630-90 (8НДв)	АО3-355-4 (250)	3	750
700	91,5			4	1000
875	91,5			5	1250
450	77	Д630-90 (8НДв)	АО3-315М-4 (200)	3	600
600	77			4	800
750	77			5	1000
500	115	ЦН 400-105 (3В-200×2)	АО3-315М-4 (200)	5	1250
1010	120	Д1250-125 (14Д-6)	СД12-52/4 (630)	3	1890
1350	120			4	2520
1010	120	Д1250-125 (14Д-6)	СД12-52/4 (630)	3	1890
1350	120			4	2520
1150	94,5	Д1600-90 (14НДс)	СД12-42-4 (500)	3	1500
1540	94,5			4	2000
1150	94,5	Д1600-90 (14НДс)	СД12-42/2	3	1500
1540	94,5			4	2000
950	66	Д1250-65 (12НДс)	А114-4М (320)	3	960
		Проекты Укргипроводхоза			
660	59,5	Д800-57 (12Д-9)	АО3-315М-4	3	200
880	59,5	То же	То же	4	200
1100	59,5	»	»	5	200
500	115	ЦН400-105 (3В-200×2)	АО3-315М-4	5	200
525	91,5	Д630-90 (8НДв)	А111-4М	3	250
700	91,5	То же	То же	4	250
850	92	»	»	5	250
500	72	Д630-90 (8НДв)	АО3-315М-4	3	200
670	72	То же	То же	4	200
750	77	»	»	5	200

Примечание. В скобках старая марка насоса. Проекты Союзгипроводхоза и Укргипроводхоза рекомендуются для повторного применения.

расходомера включаются второй и следующие рабочие насосы. Отключение насосных агрегатов происходит в обратном порядке.

9.4.2 БЛОЧНО-КОМПЛЕКТНЫЕ НС

Для повышения эффективности строительства НС массового применения, снижения трудоемкости и сроков работ на месте строительства разработаны блочно-комплектные насосные станции (БКНС) заводского изготовления, технические характеристики которых приведены в таблицах 9.15, 9.16 и 9.17, а поля $H—Q$ — на рисунке 9.13.

БКНС включают, как правило, водозаборные сооружения со всасывающими трубами, блок-боксы основного, вспомогательного и электротехнического оборудования, блок-бокс индукционного расходомера с переключающейся запорной арматурой, часть напорного трубопровода, водовоздушные баки, трансформаторную подстанцию.

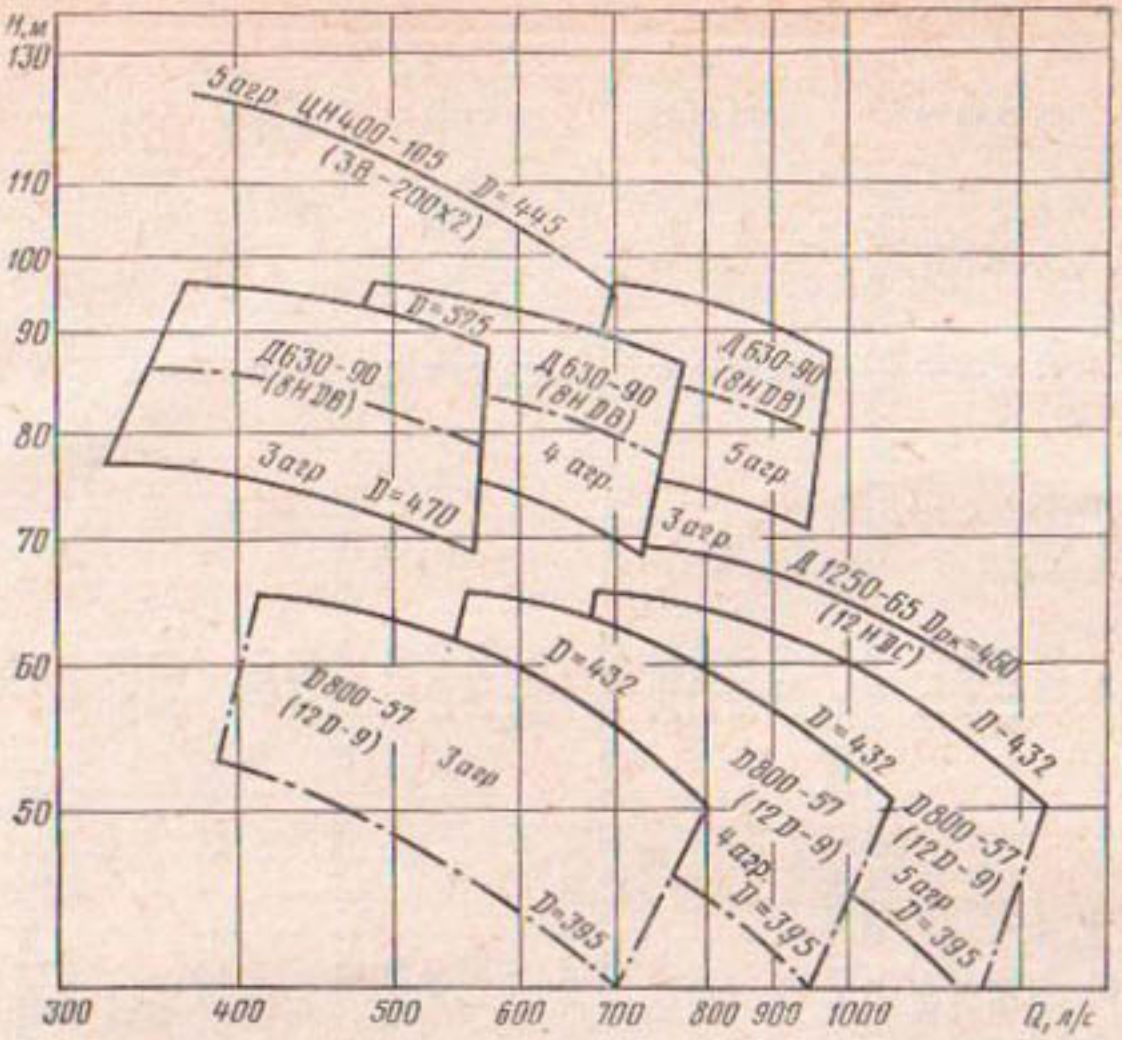


Рис. 9.12. Поле $H - Q$ типовых НС для работы на закрытую оросительную сеть с водозабором из каналов

Блок-бокс — объемный каркас с верхней обвязкой и нижней фундаментной рамой из прокатных профилей, стены и кровля из алюминиевых или оцинкованных панелей с эффективным заполнителем (типа «СЭНДВИЧ»).

Блок-боксы основного и вспомогательного гидромеханического оборудования снабжены подъемно-транспортными механизмами грузоподъемностью 2 т. Конструкция блок-боксов основного и вспомогательного оборудования обеспечивает стыковку с торцевой стороны, блок-боксы электротехнического оборудования имеют продольный стык, что обеспечивает сборку БКНС на строительной площадке из отдельных блок-боксов с оборудованием, прошедших контрольную сборку и наладку на заводах.

Компоновка узла БКНСП с погружными центробежными электронасосами на откосах приведена на рисунке 9.14.

9.4.3. ПЕРЕДВИЖНЫЕ НС ДЛЯ ЗАКРЫТЫХ ОРОСИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ С ДМ

Комплектные сезонные электрифицированные НС марок СПС 70/80 и СПС 100/100 предназначены для подачи воды на небольшие орошаемые участки (до 200...300 га). На автономных орошаемых участках станция работает по схеме: насос (СПС) — дождевальная машина; на крупномасштабных оросительных системах с машинами «Фрегат» при децентрализованной водоподаче на севооборотных участках по схеме: низконапорная НС — распределительный трубопровод — насос (СПС или СНПЭ) — дождевальная машина.

По сравнению с дизельными СПНС (см. п. 9.3.2) применение комплектных сезонных электрифицированных НС марок СПС (табл. 9.18, рис. 9.15) позволяет автоматизировать работу станций и уменьшить число обслуживающего персонала, сократить объем и стоимость ремонтных работ, увеличить

9.14. Технические характеристики стационарных НС с оборудованием концерна «Сигма» ЧССР

Индекс станции	Подача, л/с	Удельная энергия, Дж/кг	Напор, м	Установленная мощность, кВт	Число насосов	
					основных	вспомогательных
Основной насос 250QVD-500-54, электродвигатель мощностью 260 кВт; вспомогательный насос 150CVE-350-23/2, электродвигатель мощностью 75 кВт						
01	525...875	785...490	80...50	930	3	2
02	700...1100	785...490	80...50	1190	4	2
03	875...1425	785...490	80...50	1450	5	2
09	1050...1750	785...490	80...50	1710	6	2
Основной насос 250QVD-570-45, электродвигатель мощностью 400 кВт; вспомогательный насос 150CVE-350-23/3, электродвигатель мощностью 100 кВт U 380 В						
04	640...950	1078...790	110...80	1400	3	2
05	860...1260	1078...790	110...80	1800	4	2
06	1080...1575	1078...790	110...80	2200	5	2
07	1280...1900	1078...790	110...80	2600	6	2
Основной насос 250CVE-460-38/2, электродвигатель мощностью 320 кВт; вспомогательный 150CVE-350-23/3, электродвигатель мощностью 100 кВт						
15	450...600	1272...980	130...100	1160	3	2
16	600...800	1272...980	130...100	1480	4	2
17	700...950	1272...980	130...100	1800	5	2
18	860...1150	1272...980	130...100	2120	6	2
Основной насос 150CVE-350-23/3, электродвигатель мощностью 132 кВт; вспомогательного нет						
23	260...300	930...686	95...70	528	4	—
24	325...375	930...686	95...70	660	5	—
Основной насос 150CVE-350-23/4, электродвигатель мощностью 160 кВт; вспомогательного нет						
25	260...300	1225...930	125...95	640	4	—
26	325...375	1225...930	125...95	800	5	—
Основной насос 250CVE-460-38/4, электродвигатель мощностью 200 кВт; вспомогательный 125CVE-305-1914, электродвигатель мощностью 55 кВт						
33	370...450	1028...730	105...75	565	2	3
34	500...600	1028...730	105...75	765	3	3

Примечания. 1. Электродвигатели насосов 250QVD-570-54 и 250CVE-460-38/2 имеют частоту вращения 1485 мин$^{-1}$ и напряжение 6000 В, остальные 1480 мин$^{-1}$ и 380 В соответственно. 2. Станции 01...09 имеют автоматизацию по расходу воды, 15...34 — по давлению в сети. 3. Гидромеханическое оборудование рассчитано для перекачивания воды с температурой до 20 °С, pH 6...7 и содержанием взвешенных частиц до 3 г/л с крупностью зерен до 0,5 мм. Станции могут работать в районах с температурой от —30° до +40 °С.

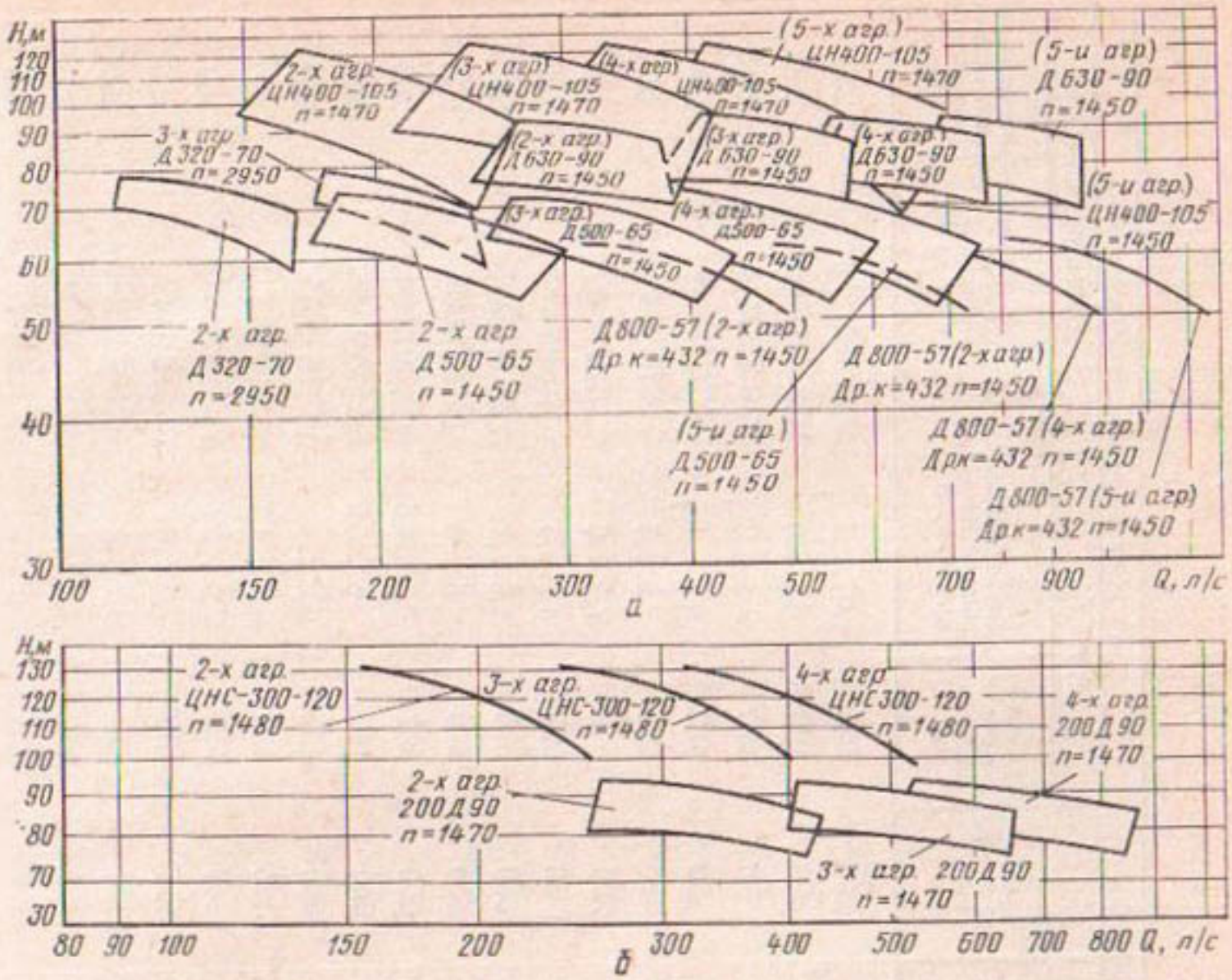


Рис. 9.13. Поле H—Q блочно-комплектных НС с оборудованием отечественного производства:

а — с насосами типа Д; *б* — с насосами ЦНС300-120 и Д200-90

в 3...4 раза срок службы станции, исключить подвозку топливно-смазочных материалов и обеспечить охрану окружающей среды от загрязнения. Система автоматики обеспечивает работу станции в режимах: ручном, автоматическом, дистанционного управления.

9.5. НС ОСУШИТЕЛЬНЫХ И ОСУШИТЕЛЬНО-УВЛАЖНИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ

Особенности конструкций НС осушительных и осушительно-увлажнительных систем зависят от назначения и применяемого насосного оборудования. По назначению различают НС одностороннего (рис. 9.16) и двухстороннего действия (рис. 9.17). По конструктивному исполнению их можно разделить на три типа: совмещенный, полураздельный и раздельный. Первый и третий тип аналогичен НС машинного водоподъема (см. п. 9.3, рис. 9.9, 9.8). Во втором типе (см. рис. 9.1, *б*, *в*) водовыпускное сооружение вынесено в НБ и связано с НС трубопроводами.

По режиму работы для НС осушительно-увлажнительных систем лучше всего подходят осевые насосы, легко поддающиеся автоматизации и обеспечивающие надежный пуск. Особенно перспективны осевые погружные насосы, позволившие несколько упростить конструкцию НС за счет упрощения подвода воды к насосам и исключения специального сухого насосного помещения (см. рис. 9.17, *б* и рис. 9.18). Еще более экономично нетрадиционное

9.15. Техническая характеристика БКНС

Индекс БКНС	Основные параметры БКНС			Основные насосные агрегаты			
				насос		электродвигатель	
	подача, л/с	манометрический напор, м	установленная мощность, кВт	диаметр рабочего колеса, мм	допускаемая высота всасывания, м	марка	номинальная мощность, кВт
БКНС-2×Д630-90	276...286	92...86	500	525	4,7...3	АО3-355	250
БКНС-2×Д630-90а	264...386	83...78	400	100	4,8...3	АО3-345М-4	200
БКНС-2×Д630-90б	253...386	76...69	400	470	5...3	АО3-315М-4	200
БКНС-2×Д800-57	320...500	62...50	400	432	6,3...4,5	АО3-315М-4	200
БКНС-3×Д500-65	282...459	73...61	480	465	7,9...5	А3-315 2-4	160
БКНС-3×Д500-65а	246...414	60...52	396	432	7,9...6	А3-315 1-4	132
БКНС-3×Д630-90	414...579	92...86	750	525	4,7...3	АО3-355-4	250
БКНС-3×Д630-90а	396...579	83...78	600	500	4,8...3	АО3-315М-4	200
БКНС-3×Д630-90б	380...579	76...69	600	470	5...3	АО3-315М-4	200
БКНС-3×Д800-57	480...750	62...50	600	432	6,3...4,5	АО3-315М-4	200
БКНС-3×ЦН400-105	252...426	120...92	600	445	6...3,8	А3-315М-4	200
БКНС-3×ЦН400-105а	237...399	106...79	480	425	6,2...4	А3-315 2-4	160
БКНС-3×ЦН400-105б	219...389	92...67	396	400	6,3...4,3	А3-315 1-4	160
БКНС-4×Д500-65	976...612	73...61	640	465	7,9...5	А3-315 2-4	160
БКНС-4×Д500-65а	328...552	60...52	528	432	7,9...6	А3-315 1-4	132
БКНС-4×Д630-90	552...772	92...86	1000	525	4,7...3	АО3-355-4	250
БКНС-4×Д630-90а	528...772	83...78	800	500	4,8...3	АО3-355М-4	200
БКНС-4×Д630-90б	506...772	76...69	800	470	5...3	А3-315М-4	200

БКНС-4×Д800-57	640...1000	62...50	800	432	6,3...4,5	АО3-315М-4	200
БКНС-4×ЦН400-105	336...568	102...92	800	445	6...3,8	АО3-315М-4	200
БКНС-4×ЦН400-105а	316...532	106...79	640	425	6,2...4	А3-315 2-4	160
БКНС-4×ЦН400-105б	292...516	93...67	528	400	6,3...4,3	А3-315 1-4	132
БКНС-5×Д500-65	470...755	73...61	800	465	7,9...5	А3-315 2-4	160
БКНС-5×Д500-65а	410...690	60...52	660	432	7,9...6	А3-315 1-4	132
БКНС-5×Д630-90	690...965	92...86	1250	525	4,7...3	АО3-355-4	250
БКНС-5×Д630-90а	660...965	83...78	1000	500	4,8...3	АО3-315М-4	200
БКНС-5×Д630-90б	633...965	76...69	1000	470	5...3	АО3-315М-4	200
БКНС-5×Д800-57	800...1250	62...50	1000	432	6,3...4,5	АО3-315М-4	200
БКНС-5×ЦН400-105	420...710	120...92	1000	445	6...3,8	А3-315М-4	200
БКНС-5×ЦН400-105а	396...665	106...76	680	425	6,2...4	А3-315 2-4	160
БКНС-5×ЦН400-105б	365...645	93...67	660	400	6,3...4,3	А3-315 1-4	132
БКНС-201 (200Д-90)	150...400	94...89	500	495	3...3,5	М280-4	
БКНС-301 (200Д-90)	150...600	94...89	750	495	3...3,5	М280-4	
БКНС-401 (200Д-90)	150...800	94...89	1000	495	3...3,5	М280-4	
БКНС-202 (ЦНС300-120)	57...200	130...104	320	435	2...5	4АН280М-4У3	
БКНС-302 (ЦНС300-120)	57...300	130...104	480	435	2...5	То же	
БКНС-402 (ЦНС300-120)	57...400	130...104	640	435	2...5	»	

Примечания. 1. Индекс БКНС-3×Д630-90 расшифровывают так: *3* — число насосных агрегатов; Д630-90 — марка насоса (может быть заменен на насос производства НРБ типа 200 Д90); буквы *а* и *б* в индексах БКНС означают установку насосов с обточкой диаметра колеса, рекомендуемой заводом. В индексе БКНС-201...БКНС-402 число агрегатов указано в первой цифре (*2* и *4* соответственно), марка насоса приведена в скобках. 2. Напряжение в электродвигателях для всех БКНС — 380 В. 3. Набор боксов БКНС: с основными насосами — по числу агрегатов; со вспомогательным оборудованием — по два для всех БКНС; с электротехническим оборудованием — по два для БКНС-2×Д630-90... БКНС-4×ЦН400-105б; по три для всех БКНС с пятью агрегатами и по одному для БКНС-201...402. Кроме того, в набор БКНС-201...402 входит бокс — монтажная площадка, в набор остальных БКНС — один бокс-бытовка.

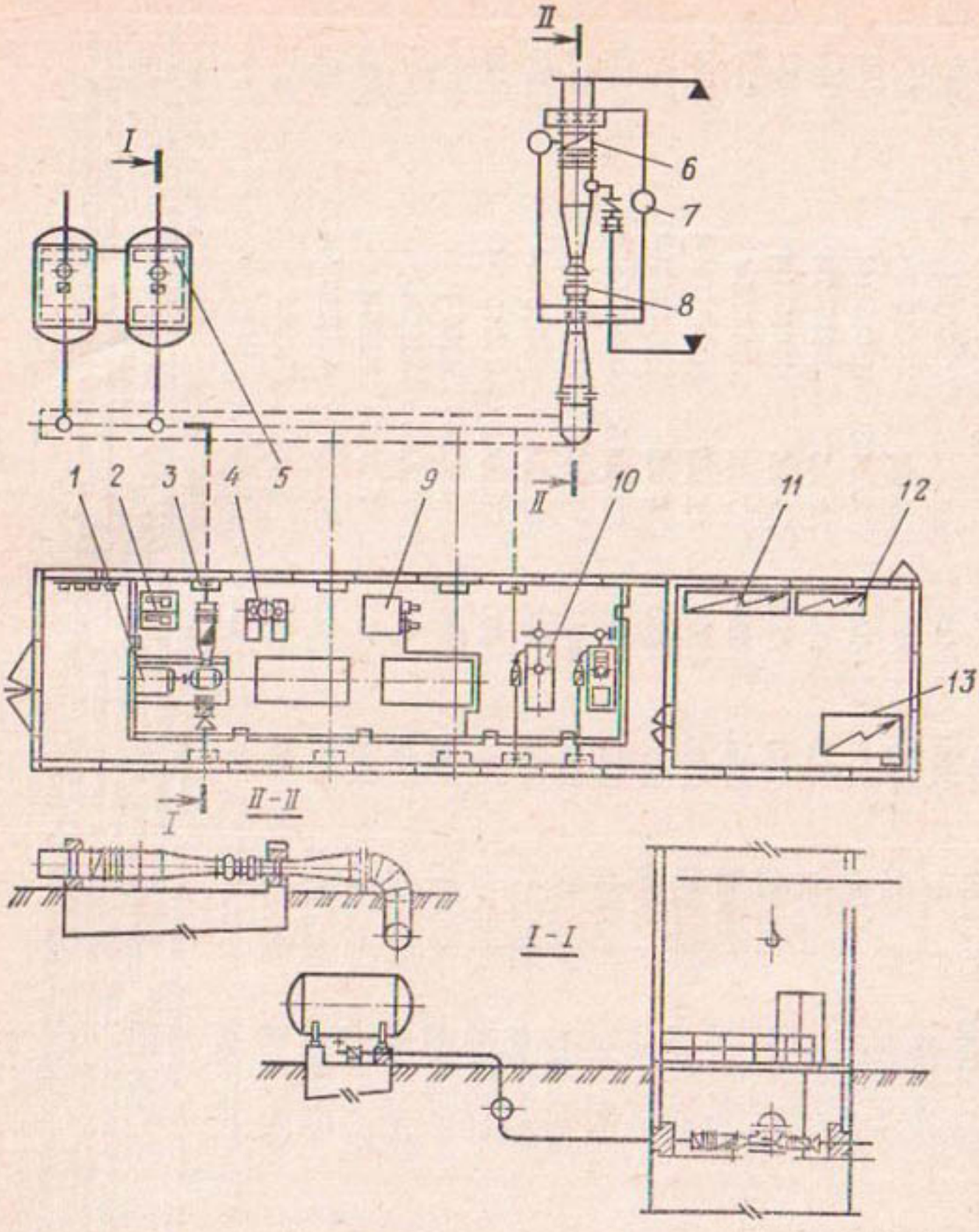


Рис. 9.14. Пример компоновки оборудования концерна «Сигма» ЧССР в здании НС:

1 — насосы типа QVD с высоковольтными электродвигателями; *2* — компрессоры; *3* — электроконтактные манометры; *4* — вакуум-насосы; *5* — водовоздушные резервуары; *6, 7* — задвижки с электроприводом на коллекторе и на техническом сбросе; *8* — индукционный расходомер; *9* — дренажные насосы; *10* — вспомогательные насосы типа CVE; *11, 12* — распределительные щиты низкого и высокого напряжения; *13* — релейный распределительный щит

решение института «Белгипроводхоз» по размещению насосного оборудования в трубчатых колодцах.

Узел НС с оборудованием в трубчатых колодцах (рис. 9.18) включает: водозаборное устройство, трубчатые колодцы для установки насосов, напорные трубопроводы с запорной арматурой, электротехнический и ремонтный блок-боксы. Насосное оборудование — погружные центробежные и осевые вертикальные моноблочные насосы (технические параметры см. в табл. 9.5,

9.16. Технические характеристики БКНС с оборудованием концерна «Сигма» ЧССР

Индекс	Подача, л/с	Удельная энергия, Дж/кг	Напор, м	Число агрегатов	Установленная мощность, кВт	Диаметр рабочего колеса насоса, мм	Кавитационный запас, Дж/кг
Основной насос 250QVD-500-54, электродвигатель марки 1AF355M-4, $N=250$ кВт, $n=1485$ мин$^{-1}$, $U=380$ В							
2.01	460	780	79,6	2	500	500	37
2.02	510	650	66,3	2	500	475	41
2.03	480	590	60,2	2	500	450	39
3.01	690	780	79,6	3	750	500	37
3.02	765	650	66,3	3	750	475	41
3.03	720	590	60,2	3	750	450	39
4.01	920	780	79,6	4	1000	500	37
4.02	1020	650	66,3	4	1000	475	41
4.03	960	590	60,2	4	1000	450	39
5.01	1150	780	79,6	5	1250	500	37
5.02	1275	650	66,3	5	1250	475	41
5.03	1200	590	60,2	5	1250	450	39
Основной насос 250QVD-570-50, электродвигатель марки 1N4355M-4, $N=400$ кВт, $n=1485$ мин$^{-1}$, $U=600$ В							
2.11	540	1020	104,1	2	800	570	42
2.12	510	920	93,9	2	800	540	39
3.11	810	1020	104,1	3	1200	570	42
3.12	765	920	93,9	3	1200	540	39
4.11	1080	1020	104,1	4	1600	570	42
4.12	1020	920	93,9	4	1600	540	39
5.11	1350	1020	104,1	5	2000	570	42
5.12	1275	920	93,9	5	2000	540	39
Основной насос 250QVD-570-50, электродвигатель марки 1AF355M-4, $N=250$ кВт, $n=1485$ мин$^{-1}$, $U=380$ В							
2.13	400	880	89,8	2	500	510	30
3.13	600	880	89,8	3	750	510	30
4.13	800	880	89,8	4	1000	510	30
5.13	1000	880	89,8	5	1250	510	30

Примечания. 1. N — мощность двигателя; n — частота вращения; U — напряжение электрической цепи. 2. Набор боксов БКНС с основными насосами — по числу рабочих агрегатов; с вспомогательным оборудованием — по два, с электрическим оборудованием — по два; с расходомером — по одному; бокс-бытовка — по одному для всех станций.

9.3). Трубчатые колодцы имеют диаметр 800...1200 мм в зависимости от марки насосного агрегата. Водозаборное устройство представляет собой самотечный трубопровод или сифонный водовод при значительных колебаниях уровня воды в источнике. Для зарядки сифонов предусматривают вакуум-систему: два вакуум-насоса ВВН-1,5 (технические параметры см. табл. 9.4), заливочный бачок и вакуум-котел. Превышение гребня сифона над уровнем воды в источнике принимают не более 4 м. Двухъярусный подвод воды к насосам (см. рис. 9.18, *в*) уменьшает фронт водозабора и тем самым улучшает гидравлический режим потока. При этом повысился КПД станции и существенно снизились капитальные затраты на их строительство.

Водозаборы НС в трубчатых колодцах требуют надежной защиты от мусора и наносов. Техническая характеристика и схема работы самоочищающихся решеток РСГ-1 и РСГ-2 приведены в таблице 9.19.

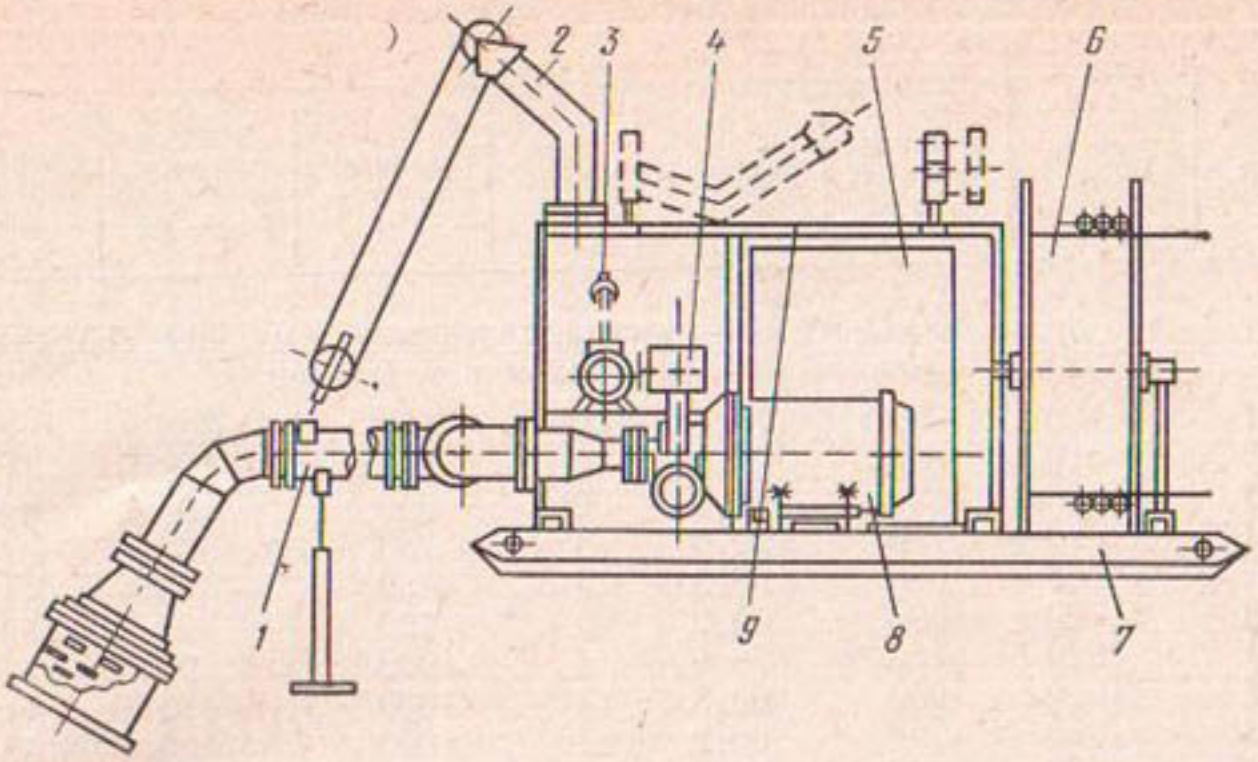


Рис. 9.15. Компоновка оборудования комплектной сезонной электрифицированной НС:

1 — всасывающая труба; *2* — поворотное устройство; *3* — лебедка; *4* — задвижка; *5* — шкаф автоматического управления; *6* — барабан для кабеля; *7* — салазки; *8* — насос с электродвигателем; *9* — капот насоса, вакуум-системы и распределительного шкафа

9.17. Технические характеристики БКНСП с погружными электронасосами с оборудованием концерна «Сигма» ЧССР

Тип НС	Подача Q, л/с	Напор H, м	КПД η, %	Число агрегатов		Установленная мощность N, кВт
				основных	вспомогательных	
Основной насос 150GQMИ-280, $N=175$ л/с, $H=80$ м, $\eta=0,76$; вспомогательный 80GMИ-250, $N=45$ л/с, $H=80$ м, $\eta=0,67$						
БКНСП-3	200...400	95...70	66...74	2	3	360
БКНСП-4	300...600	95...70	66...74	3	3	540
БКНСП-5	400...800	95...70	66...74	4	3	720
БКНСП-6	500...1000	95...70	66...74	5	3	800
Основной насос 125GQMИ-315, $N=111$ л/с, $H=125$ м, $\eta=0,73$; вспомогательный 80GMИ-315, $N=45$ л/с, $H=125$ м, $\eta=0,65$						
БКНСП-15	315...410	112...115	70...69	3	3	540
БКНСП-16	410...520	112...115	70...69	4	2	720
БКНСП-18	550...650	102...107	70...69	5	2	900
Основной насос 150GQMИ-330, $N=175$ л/с, $H=125$ м, $\eta=0,75$; вспомогательный 80GMИ-315, $N=45$ л/с, $H=125$ м, $\eta=0,65$						
БКНСП-14	300...410	133...120	72...75	2	3	540
БКНСП-17	425...600	133...120	72...75	3	3	810
БКНСП-19	570...800	133...120	72...75	4	3	1080
БКНСП-22	700...1000	133...120	75...75	5	3	1350

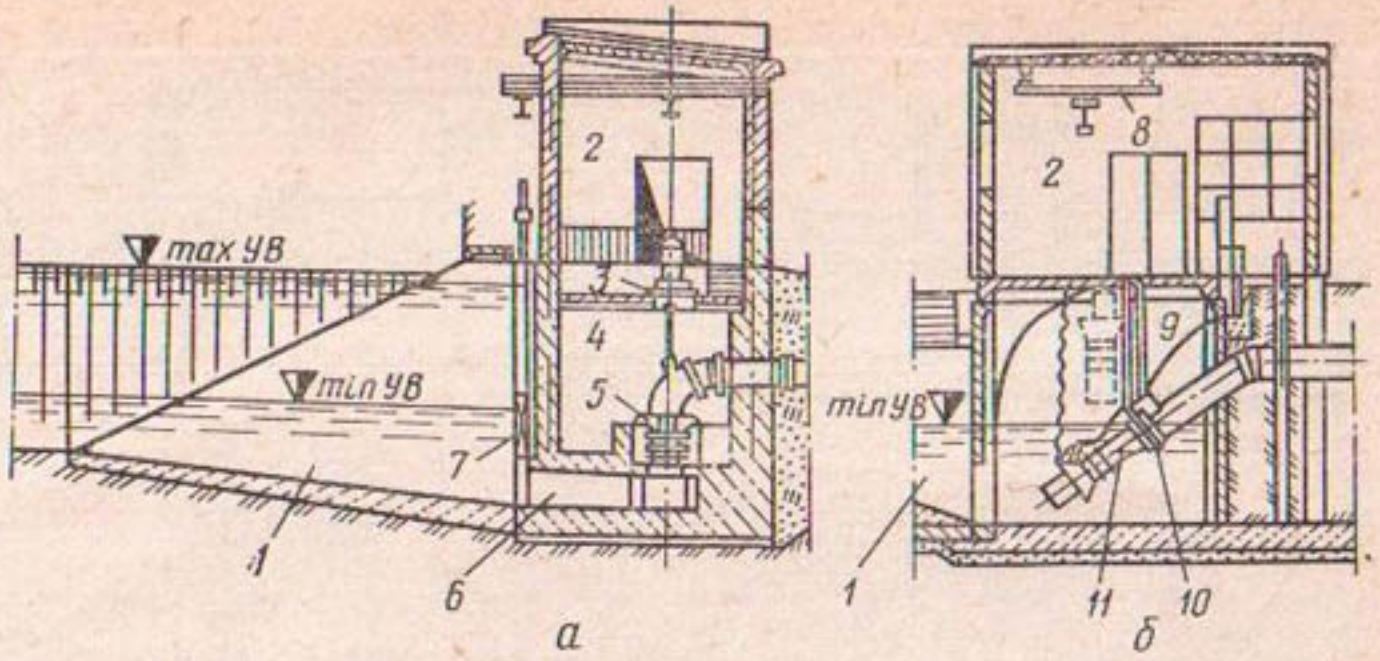


Рис. 9.16. НС одностороннего действия:

а — с сухим насосным помещением; *б* — с «мокрой» камерой; *1* — аванкамера; *2* — верхнее строение; *3* — электродвигатель; *4* — сухое насосное помещение; *5* — осевой вертикальный насос; *6* — камерный подвод; *7* — затвор; *8* — кран-балка; *9* — «мокрая» камера; *10* — разъемное соединение; *11* — осевой погружной электронасос

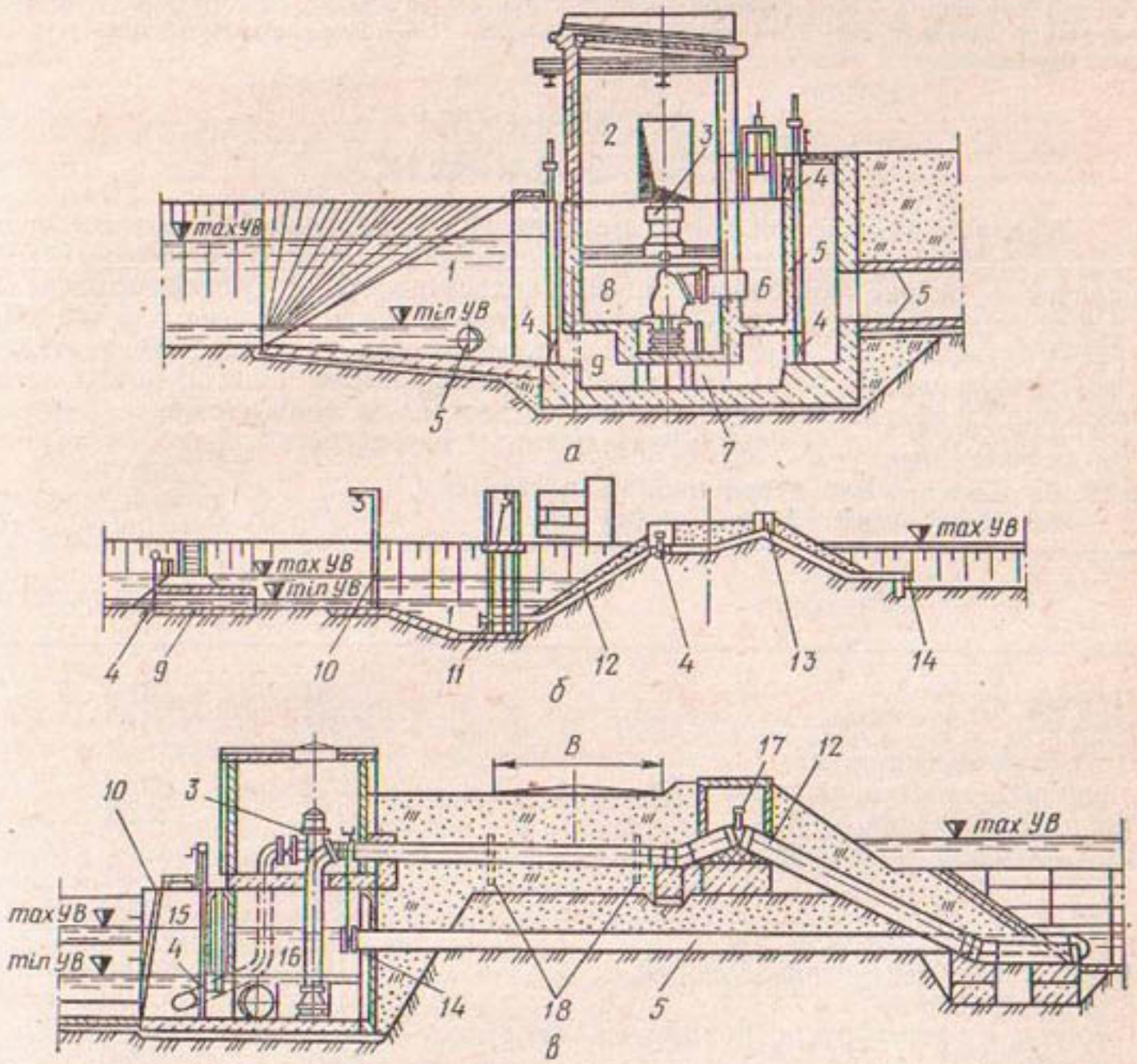


Рис. 9.17. НС двухстороннего действия:

а — с сухим насосным помещением; *б* — с погружными насосами в аванкамере; *в* — с «мокрой» камерой; *1* — аванкамера; *2* — верхнее строение; *3* — электродвигатель; *4* — затвор; *5, 12* — самотечный и напорный трубопроводы; *6* — напорный бассейн; *7* — камерный подвод воды; *8* — сухое насосное помещение; *9* — труба-регулятор; *10* — сороудерживающая решетка; *11* — погружные электронасосы; *13* — сифон; *14* — водовыпуск; *15* — водозабор; *16* — «мокрая» камера; *17* — клапан срыва вакуума; *18* — диафрагма

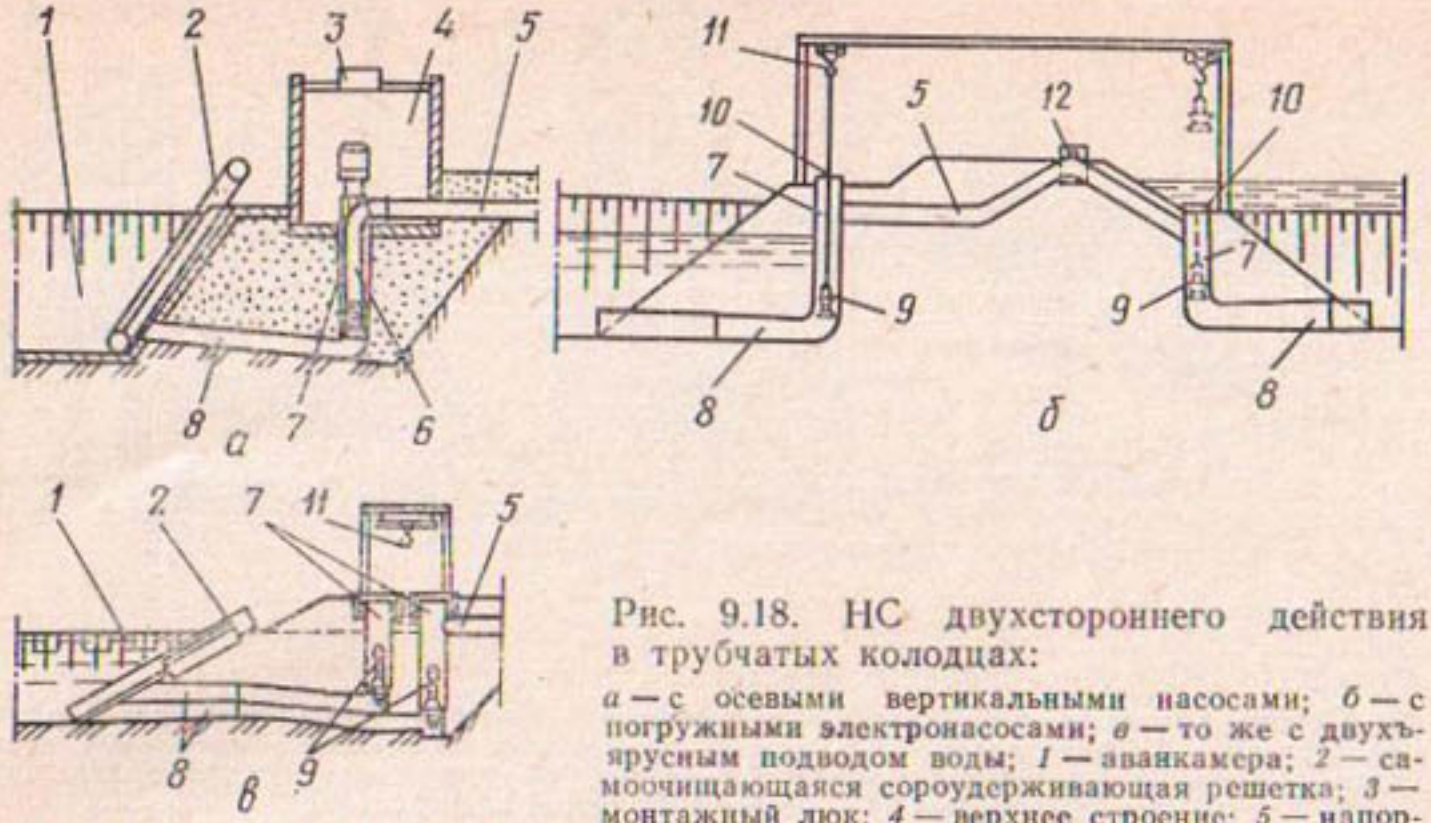


Рис. 9.18. НС двухстороннего действия в трубчатых колодцах:

а — с осевыми вертикальными насосами; *б* — с погружными электронасосами; *в* — то же с двухъярусным подводом воды; *1* — аванкамера; *2* — самоочищающаяся сороудерживающая решетка; *3* — монтажный люк; *4* — верхнее строение; *5* — напорный трубопровод; *6* — моноблочный насос; *7* — трубчатый колодец; *8* — подвод воды; *9* — погружной электронасос; *10* — герметичная крышка; *11* — подъемно-транспортное устройство; *12* — сифон

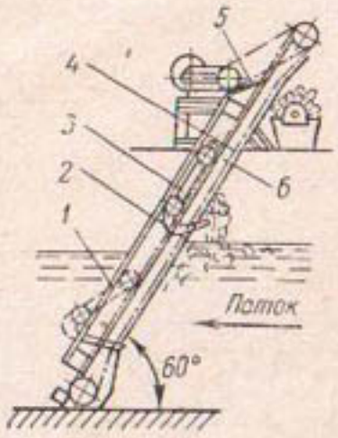
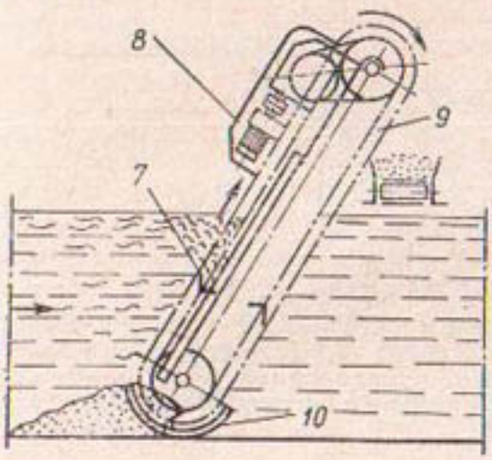
9.6. ОСОБЕННОСТИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ НС

Исходные данные для проектирования НС: назначение НС, водоисточник (водоприемник), место расположения водозабора (сбросного сооружения), наличие в районе водозабора других водопотребителей, укомплектованный график водопотребления по расчетному году для оросительных систем или график откачки для осушительных систем, особые условия эксплуатации (форсировка подачи воды, требования к регулированию подачи, объем автоматизации и телемеханизации, данные об электро- и водоснабжении, ремонтных базах и т. д.), сроки строительства и очередность ввода земель.

9.18. Технические характеристики комплектных сезонных электрифицированных НС

Показатель	СПС 70/80	СПС 100/100
Подача, л/с	70	100
Напор, м	80	100
Высота всасывания, м	3,5	3,5
Мощность электродвигателя, кВт	100	160
Частота вращения, мин$^{-1}$	2970	2965
Всасывающий трубопровод:		
длина, м	3,5	3,5
диаметр, мм	200	200
Напорный трубопровод, мм	150	200
Задвижка с электроприводом, мм	100	150
Обратный клапан, мм	100	150
Размеры в транспортном положении, мм:		
длина	4700	4700
ширина	1720	1720
высота	1960	1960
Масса станции, кг	2700	3200
Коэффициент готовности	0,98	0,98

9.19. Техническая характеристика и схема работы самоочищающихся сорозадерживающих решеток РСГ-1 и РСГ-2

Конструкция	Характеристика	Схема работы
РСГ-1 	Скорость перемещения граблины с мусором — 6,6 м/мин. Расстояние между полосами в очищаемом прозоре — 0,06 м. Расчетный пролет — не более 2,02 м. Привод от электродвигателя. Угол наклона решетки — 60°. Размеры: высота — 8900 мм, ширина — 2900 мм (1500). Масса — не более 4,62 т	Механическая очистка с помощью граблины; перемещение вверх-вниз посредством роликовой цепи. Съем мусора с решетки — при движении каретки вверх; с граблины — при движении вниз. Нижнее и верхнее крайнее положение каретки контролируется конечными выключателями. Со стороны чистой воды — защитная стационарная решетка
РСГ-2 	Скорость перемещения граблины с мусором и наносами 4,35 м/мин. Расстояние между полосами в очищаемом прозоре — 0,057 м. Расчетный пролет — не более 3 м. Привод от редуктора. Угол уклона решетки — 60°. Размеры: высота — 689 мм, ширина — 1418 мм. Масса — не более 3 т	Транспортер состоит из рамы, к которой спереди по всей длине прикреплены стержни (круг или полоса), с определенным шагом. Сор, задержанный стержнями, снимают граблины, передвигающиеся по замкнутой траектории тяговыми цепями. Сброс сора — в бункер или транспортер. Наносы задерживаются песколовкой и удаляются граблинами с ковшами

Примечание. *1* — направляющие холостого хода; *2* — граблина; *3* — каретка; *4* — роликовая цепь; *5* — откидной кронштейн; *6* — рабочие направляющие; *7* — граблина с ковшами; *8* — навесной привод; *9* — круглозвенная цепь (якорная); *10* — песколовка.

Мощность и состав насосного оборудования определяют в соответствии с рекомендациями пп. 9.2.2...9.2.4 в зависимости от назначения станции и условий ее работы. При возможности предусматривают применение БКНС заводского изготовления.

Здания стационарных НС. Верхние строения стационарных НС проектируют как обычные промышленные здания: бескаркасные и каркасные, если их оборудуют подвесными кранами грузоподъемностью не более 5 т, и только каркасные — при установке мостовых кранов.

Подземная часть здания НС должна иметь надежное основание. При сухих грунтах, обладающих хорошей несущей способностью, под здание НС укладывают бетонную подготовку толщиной 8...20 см; гидроизоляционный слой из асфальтовой мастики толщиной 0,5...1 см или из асфальта толщиной 2...3 см, армированного стальной сеткой; защитную цементную стяжку толщиной 2...3 см.

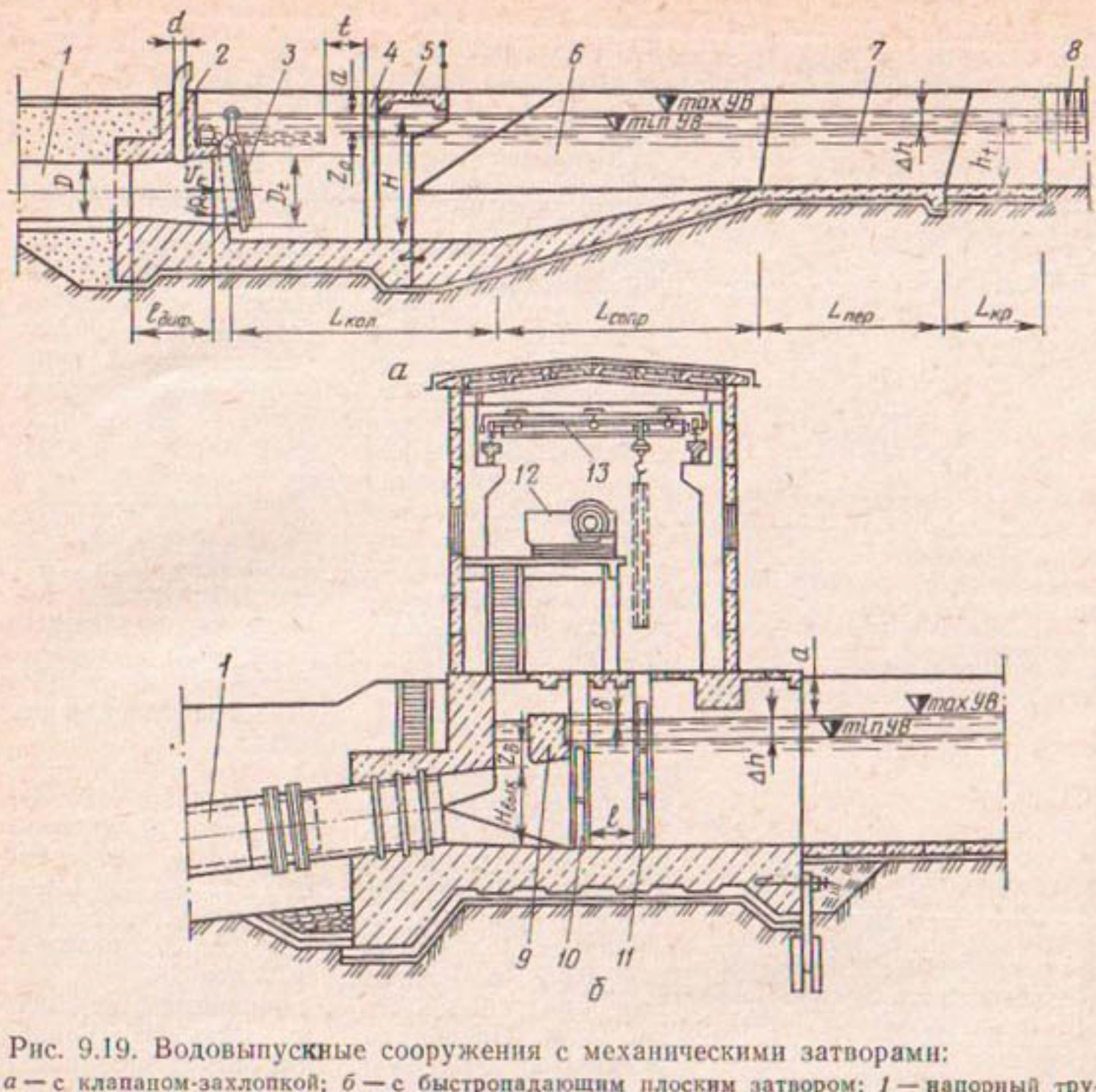


Рис. 9.19. Водовыпускные сооружения с механическими затворами:

а — с клапаном-захлопкой; *б* — с быстропадающим плоским затвором; *1* — напорный трубопровод; *2* — воздушная труба; *3* — диск клапана-захлопки; *4, 12* — паз и механизм плоского затвора; *5* — служебный мостик; *6* — колодец; *7* — переходной участок; *8* — отводящий канал; *9* — порог; *10* — плоский затвор; *11* — ремонтный затвор; *13* — грузоподъемное устройство

При мокрых грунтах основания в грунт втрамбовывают гравий или щебень слоем 10...25 см, выравнивающий поверхность основания.

При слабых грунтах рекомендуют применять различные виды специальных подготовок для упрочения оснований (см. гл. 2).

Подземную часть зданий НС выполняют из сборного или монолитного железобетона.

При проектировании НС объем дорогостоящей подземной части стремятся заложить минимальным. С этой целью вспомогательные системы, требующие увеличения ее размеров, выносят в наземную часть станции, а устойчивость здания обеспечивают за счет грунтовых пригрузок, анкерных понуров, применения наклонного основания и т. д.

В зданиях НС наземного типа подземной частью является фундамент, закладываемый ниже глубины промерзания. В бескаркасных зданиях — ленточный из бутобетона, монолитного бетона или из специальных блоков; в каркасных — из сборных, железобетонных конструкций заводского изготовления.

Для защиты бетонных конструкций от воздействия агрессивной среды обычно используют окрасочную и оклеечную гидроизоляцию.

Наземную часть зданий НС рассчитывают как обычное промышленное здание, а подземную — как гидротехническое сооружение.

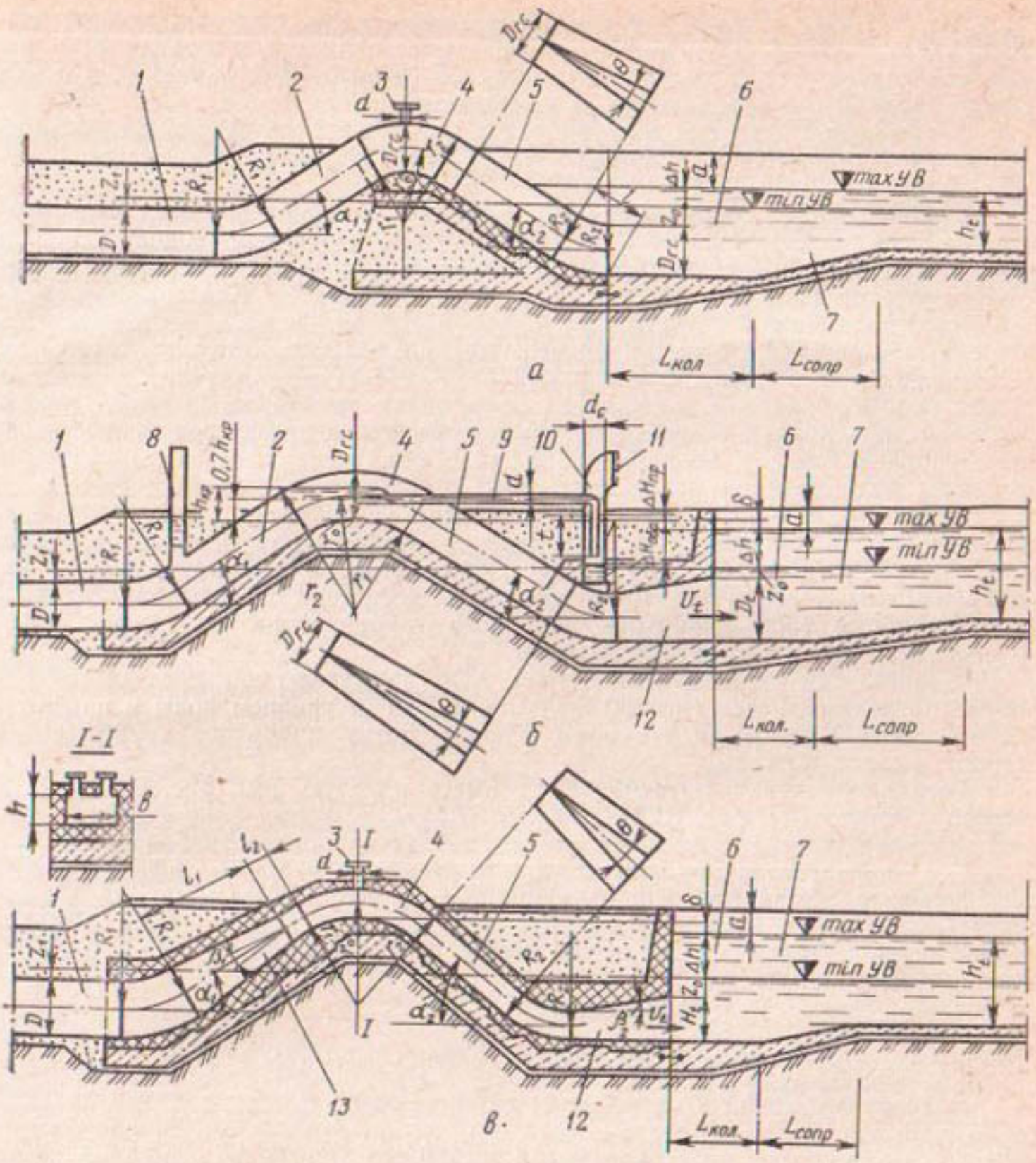


Рис. 9.20. Водовыпускные сооружения сифонного типа:

а — круглого сечения; *б* — круглого сечения с гидравлическим клапаном срыва вакуума; *в* — прямоугольного сечения; *1* — напорный трубопровод; *2, 5* — восходящая и нисходящая ветви сифона; *3* — люк для установки КСВ; *4* — горло сифона; *6* — колодец; *7* — переходный участок; *8, 9* — аэрационная и скоростная КСВ трубы; *10, 11* — клапан и предохранительная решетка КСВ; *12* — нижний отвод; *13* — переходной участок с круглого на прямоугольное сечение

Напорные трубопроводы узла НС. Материал, диаметр и число ниток напорных трубопроводов узла НС выбирают на основании технико-экономических расчетов с учетом местных условий строительства, назначения и капитальности сооружения. В зависимости от диаметра и давления используют асбестоцементные, железобетонные (сборные и монолитные) и стальные трубы.

При проектировании напорных трубопроводов трассу выбирают на устойчивых к оползанию участках, трубопровод прокладывают по возможности с непрерывным подъемом, избегая поворотов трассы в плане и в вертикальной плоскости.

Число ниток напорного трубопровода длиной до 100 м принимают равным числу насосов. При длине трубопровода 100...300 м объединение нескольких ниток в одну обосновывают технико-экономическим расчетом, а при длине более 300 м объединение их обязательно.

Экономичный диаметр трубопроводов определяют на основании технико-экономических расчетов, используя метод сравнительной экономической эффективности капитальных вложений.

Водовыпускные сооружения НС. Основные требования к их конструкциям — сопряжение напорных трубопроводов с открытым водоприемником при минимальных потерях напора и надежном автоматическом предотвращении обратного тока при выключении насосных агрегатов. Конструкцию водовыпусков определяют с учетом размеров, материала и числа напорных трубопроводов, а также насосов, работающих на каждую нитку трубопровода, колебаний уровней воды в водоприемнике. Размеры водовыпусков зависят от максимального расхода воды через одну нитку трубопровода Q_{max}, максимальной допускаемой скорости потока на выходе из диффузора v_t и колебаний уровней воды в водоприемнике Δh. Ориентировочные конструктивные размеры водовыпусков различных типов приведены в таблице 9.20.

Водовыпуски с механическими запорными устройствами (рис. 9.19) применяют при любых диаметре и материале напорных трубопроводов, числе насосов, работающих на одну нитку трубопровода, колебании уровней в водоприемниках Δh. Для предотвращения обратного тока воды используют клапаны-захлопки (при диаметрах напорного трубопровода $D<1{,}2$ м), поворотные, плоские и сегментные затворы.

Водовыпуски сифонного типа (рис. 9.20) применяют при превышении напора (наивысшей части сифона) над минимальным уровнем воды в приемнике не более 6 м и подаче воды в одну нитку напорного трубопровода одним — тремя насосами.

Горловые сечения сифонов могут иметь круглую (см. рис. 9.20, *а*, *б*) и прямоугольную (см. рис. 9.20, *в*) формы. Круглую форму поперечного горлового сечения обычно применяют при диаметрах напорного трубопровода $D<2{,}2$ м, прямоугольную — при $D>2{,}2$ м. Воду из каждого сифона обычно выпускают в общий колодец, имеющий форму ковша. Минимальный расход воды через сифон, при котором не образуется воздушный мешок в горле сифона, так называемый зарядный расход $Q_{зар}$, можно определить по формулам САНИИРИ:

для круглого горлового сечения

$$Q_{зар} = \sqrt{g}\, D_{гс}^{2,5} (0{,}53 - 0{,}17\alpha_1/90°);$$

для прямоугольного горлового сечения

$$Q_{зар} = \sqrt{g}\, Ab \sqrt{h^3/\alpha},$$

где g — ускорение свободного падения, м/с²; $D_{гс}$ — диаметр горлового сечения сифона, м; α_1 — угол наклона восходящей ветви сифона, град; A — коэффициент, зависящий от формы горлового сечения сифона, $A=1{,}06—0{,}16$ (b/h) (обычно принимают $A=0{,}6...0{,}7$); b, h — ширина и высота прямоугольного горлового сечения сифона, м; α — коэффициент Кориолиса, $\alpha=1{,}05$.

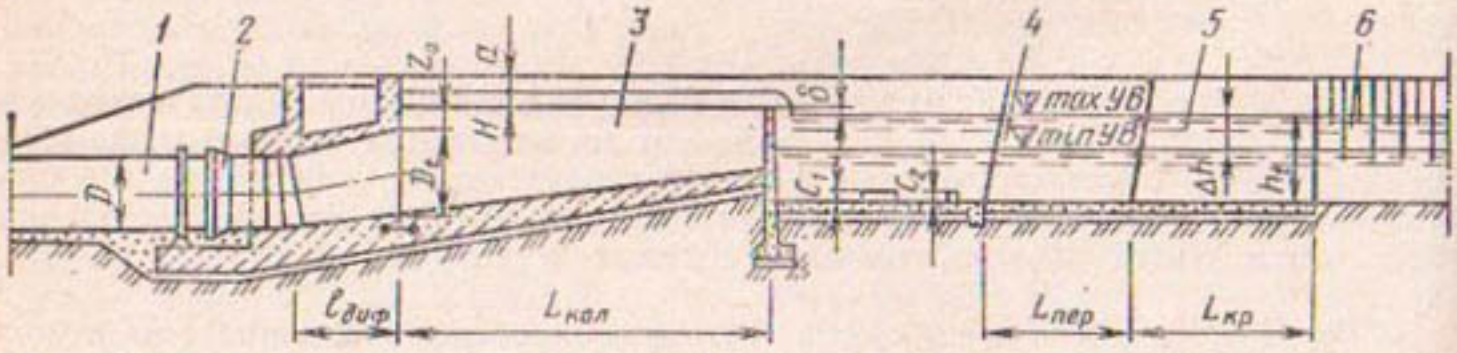


Рис. 9.21. Водовыпускное сооружение с переливными стенками:

1 — напорный трубопровод; *2* — температурный компенсатор; *3* — водоприемный колодец; *4*, *5* — переходный и крепленый участки; *6* — отводящий канал

Для снижения зарядного расхода $Q_{зар}$ уменьшают площадь горлового сечения сифона до 20% по сравнению с площадью сечения напорного трубопровода.

Обратный ток воды в сифоне предотвращают с помощью установки клапана срыва вакуума (см. гл. 8), при срабатывании которого горловая полость сифона сообщается с атмосферой, что исключает течение жидкости в обратном направлении.

Водовыпуски с переливными стенками (рис. 9.21) применяют при небольших колебаниях уровней в водоприемнике (0,5 м, иногда до 1 м), так как высота водослива $H+\delta+\Delta h$ — это потерянный напор воды, требующий дополнительного расхода электроэнергии. Поэтому, несмотря на простоту конструкции и высокую надежность работы указанного типа водовыпускного сооружения, необходимо технико-экономическое обоснование.

9.7. АВТОМАТИЗАЦИЯ УПРАВЛЕНИЯ РАБОТОЙ НС

При автоматизации работы НС обычно решают две задачи: автоматизация работы станции в контуре мелиоративной системы и автоматизация технологических процессов на самой станции. Основное и вспомогательное оборудование НС в своей работе связано едиными технологическими процессами, автоматизация которых обеспечивается комплексом технических средств, в который входят средства контроля технологических и электрических параметров на станции, исполнительные и управляющие логические устройства, средства дистанционного (телемеханического) управления и контроля, кабельные коммуникации и системы связи.

Автоматизация работы НС в контуре мелиоративной системы. На осушительных системах заданный уровень воды в каналах поддерживают автоматически, регулируя работу насосов по сигналам датчиков контроля уровня, установленных в аванкамере.

На станциях, подающих воду в резервуар или напорный бассейн оросительного канала, датчики контроля уровня воды устанавливают в резервуаре (бассейне). Наиболее сложна автоматизация подкачивающих станций, работающих на закрытую оросительную сеть. Задачей такой станции является подача требуемого количества воды с заданными оптимальными параметрами в любую точку участка с закрытой оросительной сетью, подключенного к НС. Обычно станции подкачки проектируют для работы по спросу потребителей оросительной сети. Для этой цели предусматривают работу станции в двух режимах: дежурном и рабочем.

Дежурный режим работы НС обеспечивает группа вспомогательных насосов (обычно два насоса), подача каждого составляет 15...25% подачи основного насоса. Вспомогательные насосы используют для поддержания дежурного режима при отсутствии разбора воды на орошение и для первичного заполнения закрытой оросительной сети. Возможно их применение и как дополнительных насосов, обеспечивающих подачу воды на орошение в объеме своей подачи.

Вспомогательные насосные агрегаты включаются и выключаются автоматически по сигналам датчиков контроля давления в напорной сети.

Рабочий режим работы НС обеспечивает группа основных насосных агрегатов (обычно 2...5). Подача НС определяет число включенных в работу насосных агрегатов в зависимости от потребности (см. п. 9.2.3). Для обеспечения более высокого качества регулирования применяют (в частности, концерн «Сигма» ЧССР) технические решения, в которых вспомогательные насосы используют в роли разменных. Их включают в работу в интервалах включения и отключения основных насосных агрегатов.

Формирование команд на управление пуском и остановкой основных и вспомогательных насосных агрегатов осуществляют автоматическими регуляторами подачи НС. Наибольшее применение нашли релейные устройства типа ЯА9621 и ЯА9622, которые обеспечивают также автоматическое включение неработающего насосного агрегата при аварии работающего, циклич-

ность замены агрегатов для обеспечения равномерности их наработки, автоматическую остановку НС при порыве напорного трубопровода, автоматический перевод НС в дежурный режим при отсутствии водопотребления.

На практике находят применение бесконтактные регуляторы типа «Струм», разработанные Киевским институтом автоматики, автоматизированный микропроцессорный телекомплекс ЛТК-133 и ряд других аналогичных устройств.

Управление регулированием подачи НС осуществляют по давлению в напорном трубопроводе, подаче воды (расходу) или потребляемой электродвигателем активной мощности. Обычно для автоматического управления работой НС используют комбинацию двух из этих параметров.

Автоматизация работы станционного оборудования. На подкачивающих НС, независимо от напряжения питания электродвигателей насосов, распределение электроэнергии при напряжении 380/220 В, коммутация, управление электродвигателями основных и вспомогательных насосных и вспомогательных агрегатов, а также автоматизации режимов их работы при использовании релейных схем осуществляют низковольтными комплектными устройствами управления электроприводами мелиоративных станций (УКМ), наиболее часто применяемая на практике номенклатура которых приведена ниже.

Наименование	Тип
Блок технологических защит насосного агрегата	Я5105
Блок управления электродвигателями мощностью 10...75 кВт (40...250 кВт)	Я5106
Блок управления двигателем поворота лопастей	Я5401
Блок управления электроприводом задвижки с односторонней (двухсторонней) муфтой	Я5402
Блок управления двумя электродвигателями	Я5912
Блок с автоматическими выключателями	Я8501
Блок учета энергии	Я8801
Блок контроля уровней воды	Я9102
Блок управления вентиляторами и нагревателями	Я9304
Блок сигнализации дежурному на дому	Я9501
Блок с реле	Я9901
Шкаф ввода	Ш8101
Шкаф секционный	Ш8301
Ящик ввода	ЯУ8201, ЯУ8215
Ящик измерения	ЯУ8210, ЯУ8501... ЯУ8503, ЯУ8512
Ящик поворота лопастей	ЯА5409
Ящик управления двигателями вакуум-насосов	ЯА5105, ЯА5106
Ящик управления двигателями дренажных насосов	ЯА5107
Ящик управления двигателем насосного агрегата	ЯА5101
Ящик сигнализации (220 В)	ЯА8401
Ящик сигнализации (220 В)	ЯА8402
Ящик управления двигателем бустерного насоса	ЯА5112
Ящик защиты и сигнализации насосного агрегата	ЯА9601, ЯА9804
Ящик управления	ЯА9613
Ящик автоматики для двух-, трехагрегатной НС	ЯА9621
Ящик автоматики для четырех-, пяти-, шестиагрегатной НС	ЯА9622
Шкаф управления основным насосным агрегатом	ША5102, ША5103, ША5104
Шкаф ввода	ША8220
Шкаф секционный	ША8222

Кроме указанных УКМ, для комплектования НС используют щиты управления заводов Минводхоза РСФСР, Укрглавэлектромонтажа, а также щиты, поставляемые в составе комплектных НС концерном «Сигма» ЧССР.

Коммутацию, защиту и сигнализацию о состоянии насосных агрегатов с высоковольтными электродвигателями осуществляют высоковольтными комплектными распределительными устройствами. Наиболее современные из них — комплектные распределительные устройства типа КМ-1 с масляными выключателями и типа КРУВ-10 с вакуумными выключателями, технические данные которых приведены ниже.

	КМ-1	КРУВ-10
Номинальное напряжение, кВ	6, 10	6, 10
Номинальный ток сборных шин, А	1000, 1600, 2000, 3200	1000
Номинальный ток главных цепей шкафа, А	630, 1000, 1600, 2000, 3200	300, 530, 800
Номинальный ток отключения выключателя, кА	20	20
Электродинамическая стойкость к токам короткого замыкания, кА	51	51
Размеры шкафа, мм	75×1200×2150	800×1054×2100

Это низковольтное и высоковольтное электрооборудование предназначено для внутренней установки и работает при температуре окружающей среды ±40 °С.

Для коммутации и организации электрических защит насосных агрегатов с низковольтными электродвигателями используют низковольтные комплектные устройства с воздушными выключателями А3700 и АЕ2000. Схемы обеспечивают аварийное отключение насосного агрегата от сети при срабатывании электрических защит.

Схемы управления высоковольтными насосными агрегатами находятся в ящиках управления типа УКМ, а низковольтными агрегатами — в шкафах управления. Схемы обеспечивают: нормальный пуск и остановку агрегата как со щита управления, так и по командам с диспетчерского пункта средствами телемеханики или станционных устройств автоматики; аварийную остановку агрегата при действии электрических и гидромеханических защит; предупредительную и аварийную сигнализацию, а также передачу аварийного сигнала средствами телемеханики на диспетчерский пункт.

Время пуска и остановки насосного агрегата контролирует реле времени, тип которого зависит от типа насосного агрегата и технологической схемы НС. Устанавливают его при наладке.

Аварийную остановку насосного агрегата осуществляют при действии следующих защит: электрических; неудачного пуска (остановки) насосного агрегата; температурных, засорения сороудерживающей решетки; понижения уровня воды в полости всасывания насосного агрегата, аварийного уровня воды в НБ.

При исчезновении напряжения на шинах НС выключатель электродвигателя отключается защитой минимального напряжения, имеющей выход на реле защит агрегата. Сигналы о неисправности механизмов собственных нужд подкачивающих НС выдает соответствующая коммутационная аппаратура в схему центральной сигнализации НС на сигнальные реле.

Технологический контроль на НС. Он обеспечивает защиту оборудования от работы в аварийных режимах; автоматизацию работы станции и отдельных ее систем; визуальный контроль технологических параметров (расхода, уровня воды, давления, температуры). Выполняют его *приборами визуального контроля* (стрелочные манометры, мановакуумметры, электрощитовые приборы) и *датчиками контроля* технологических параметров с различными по исполнению выходами: аналоговыми, частотными, потенциометрическими и др.

Контролируемые на НС технологические параметры, места установки приборов контроля, их типы и назначение указывают на схеме технологического контроля НС.

Контроль расхода (подачи) НС осуществляется расходомерами различных типов.

ПРЕДМЕТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ

Арматура 79
— — трубопроводная 386
— — аэрационная 389
— — запорная 386
— — предохранительная 393
— — регулирующая 389
— — соединительная 397
Бетон 69
Вакуум-насос 423
Вантуз 393
Вместимость водохранилища 112
Водосброс 217
— аварийный 347
— глубинный 212
— открытый 220
— резервный 239
— трубчатый 236
— туннельный 236
Водовыпуск 330
— регулятор 334
— регулятор-переезд 334
— НС 457
Вододелитель 346, 351
Водослив 225
— практического профиля 228
— — безвакуумный 228
— — вакуумный 232
—с широким порогом 226
Водохранилище 102, 106
Воздействие волновое 34
— льда 32
— температурное 30
— силовое фильтрующейся воды 26
Волна перемещения 291
— обратная 292
— прямая 292
Галерея дренажная 166
Гаситель энергии потока 248, 250
Гидроподъемник 403
Гидроузел бесплотинный 92, 93
— водозаборный 82
— водохранилищный 100
— плотинный 84, 86
— — боковой 87
— — решетчатый 91
— — фронтальный 89
— речной 83
Градиент контактного выпора 66
— размыва 66
— суффозии 66
— фильтрационного напора 67
— фильтрации критический 68
Грунты нескальные 14
— скальные 14
Давление грунта боковое 27, 28
— наносов 30
Деформации основания 50
— фильтрационные 64, 66
Диафрагма 148, 150
Дренаж вертикальный 162, 163
— горизонтальный 154, 162
— комбинированный 154, 163
— наклонный 163
— наслонный 153
— трубчатый 154
Дюкер-переезд 353
Завеса противофильтрационная 153, 165, 180, 188
Заложение откоса 145, 264
Запруда 348, 357
Затвор вальцовый 368
— глубинный 371
— диафрагменный 385
— дисковый 373
— игольчатый 373
— клапанный 368, 381, 383
— конусный 373
— крышевидный 368
— наполняемый 370
— плавучий 371
— плоский 365, 372, 377
— поверхностный 365
— сегментный 368
— секторный 368
— цилиндрический 373, 375, 384
— шаровой 373
Зональность укладки бетона 69, 70, 174
Камера затворная 371
Канава противоэрозионная 355
Канал лотковый 268
— оросительный 26
— осушительный 261
Клапан впуска и выпуска воздуха 389
— впуска и защемления воздуха 393
— защитный гидравлический 397
— обратный 386
— срыва вакуума 393
Класс бетона 69, 71
— сооружений 9, 11, 23
Колодец водобойный 251, 252
Коэффициент бокового давления грунта 28
— водозабора 82
— заложения откоса 145, 264
— надежности 36
— неоднородности грунта 13
— подтопления водослива 231, 234
— пористости 15
— Пуассона 20
— разнозернистости 65
— расхода водослива 229, 230
— сжатия потока 232
— полезного действия 264
— условий работы 36, 77, 273
— фильтрации 19, 296, 298
— форсировки 263
— Шези 278
— шероховатости 279
Крен сооружения 63
Крепление каналов 299
— НБ 246
— откоса плотин 155
Ливнеспуск 349
Марка бетона 71
Модуль деформации грунтов 61
Нагрузки на гидросооружения 25
— на трубопровод 315
Насос 416
— осевой 422

— погружной 424
— центробежный 418, 426
Наполнение водохранилища 115
Носок-трамплин 254
Отстойник непрерывного действия 127
— с комбинированной очисткой 129
— с механической очисткой 128
— с периодическим гидропромывом 123
Плотина Арочная 194
— арочно-гравитационная 194
— бетонная 157
— взрывонабросная 140
— водосбросная 178
— глухая 160
— гравитационная 157
— деревянная 202
— железобетонная 157
— земляная намывная 138
— земляная насыпная 138
— из грунтовых материалов 135
— каменно-земляная 138
— каменно-набросная 138
— контрфорсная 188, 190
— массивно-контрфорсная 188
— противоэрозионная 358
— тканевая 208
— ячеистая 161
Плотность грунта 15
Покрытие 154
Показатели свойств бетона 69
— — грунтов 13
— физических свойств грунтов 13, 15
— физико-механических свойств грунтов 14, 17
— физико-химических свойств грунтов 14, 16
Понур анкерный 178, 183
— гибкий 183
— жесткий 183
Пористость грунта 15
Противодавление 26
Прочность грунта 14, 19
— — фильтрационная 36, 45
Размыв контактный 64
Разрезка плотин 168, 186
Расход воды расчетный 12, 264
— фильтрационный 295, 296, 299
Расщепитель потока 248
Регулятор 332
Решетка сороудерживающая 453
Рыбозаградитель 111
Рыбонакопитель 111
Рыбоподъемник 109
Рыбоход 108
Сечение канала поперечное 264
Скорость потока
— — допускаемая незаиляющая 277
— — — неразмывающая 272
— — средняя 278
Случай расчетный основной 12
— — поверочный 12
Смещение сооружения 62
Сооружение гидротехническое 9, 10
— на лотках 350
— на трубопроводах 350
— противоселевое 359
— противоэрозионное 355
— рыбозащитное 102, 110
— рыбопропускное 101
Сопротивление арматуры 79
— бетона 74
Состояние предельное 36, 38
Станция насосная 413
— блочно-комплектная 442
— осушительных систем 445
— передвижная 436, 443
— плавучая 436
— стационарная 433, 436
Сцепление удельное 17, 18, 20, 21
Терраса противоэрозионная 356
Трубопровод 308
Угол внутреннего трения 17, 18, 20, 21
Удар гидравлический 313
Уплотнение швов плотин 173
Устройство водомерное 385
— дренажное 147, 162, 182
— подъемно-транспортное 397
— предохранительно-сбросное 395
— противоэрозионное 146, 165
Устой 184
Устойчивость сооружений 39
— откосов 42
Фильтр обратный 65
Фильтрация из каналов 294
— свободная 295
— с подпором 299
Фланец гидротехнический 397
Швы плотин 167, 192
Экран 143, 146
Элементы живого сечения потока 269
Энергия потока удельная 268
Эпюра силового воздействия воды 26, 27
Ядро 140, 143

Оглавление

Предисловие 7

Глава 1. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ МЕЛИОРАТИВНЫХ ГИДРОТЕХНИЧЕСКИХ СООРУЖЕНИЙ 9

1.1. Классификация сооружений 9
1.2. Классы сооружений 9
1.3. Особенности работы сооружений 11
1.4. Расчетные расходы сооружений 12
1.5. Основания сооружений 13
1.5.1. Показатели свойств грунтов 13
1.5.2. Методы улучшения грунтов оснований 20
1.6. Типизация сооружений мелиоративного назначения . . 23

Глава 2. НАГРУЗКИ И ВОЗДЕЙСТВИЯ НА СООРУЖЕНИЯ. ОСОБЕННОСТИ РАСЧЕТОВ ПО ПРЕДЕЛЬНЫМ СОСТОЯНИЯМ 24

2.1. Нагрузки и воздействия 24
2.2. Определение нагрузок и воздействий . . . . . .
2.3. Расчет гидротехнических сооружений по предельным состояниям 36
2.4. Расчет устойчивости сооружений 39
2.5. Расчеты прочности бетонных сооружений 45
2.6. Расчет деформаций оснований сооружений 50
2.7. Фильтрационные деформации грунтов оснований сооружений и прогноз их фильтрационной прочности 64
2.8. Основные физико-механические свойства материалов для бетонных и железобетонных сооружений 69
2.8.1. Бетон. Основные требования и свойства 69
2.8.2. Нормативные и расчетные характеристики бетона 74
2.8.3. Арматура. Виды и характеристики 79

Глава 3. ГИДРОУЗЛЫ МЕЛИОРАТИВНОГО НАЗНАЧЕНИЯ . . . 82

3.1. Классификация. Общие принципы компоновки 82
3.2. Речные водозаборные гидроузлы 83
3.2.1. Основные типы. Расчетные расходы 83
3.2.2. Плотинные водозаборные гидроузлы 86
3.2.3. Бесплотинные водозаборные гидроузлы 92
3.2.4. Особенности расчета 92
3.2.5. Занесение и промыв ВБ 98
3.3. Водохранилищные мелиоративные гидроузлы 100
3.3.1. Основные типы и их сравнительная характеристика 100
3.3.2. Рыбопропускные и рыбозащитные сооружения водозаборных гидроузлов 106
3.4. Водохранилища 111
3.4.1. Классификация. Основные требования к проектированию 111
3.4.2. Особенности эксплуатации мелиоративных водохранилищ 114
3.5. Отстойники 119
3.5.1. Классификация. Требования к проектированию . . 119
3.5.2. Конструкции отстойников оросительных систем 123
3.5.3. Гидравлический расчет отстойников оросительных систем 129

Глава 4. ПЛОТИНЫ 135

4.1. Общая классификация. Особенности проектирования . . 135
4.2. Плотины из грунтовых материалов 135
4.2.1. Классификация 135
4.2.2. Условия применения грунтовых плотин различных типов 135

4.2.3. Требования к грунтовым материалам для возведения плотин 143
4.2.4. Конструкции грунтовых плотин 144
4.2.5. Состав расчетов грунтовых плотин 151
4.3. Бетонные и железобетонные плотины 157
4.3.1. Классификация бетонных и железобетонных плотин 157
4.3.2. Гравитационные плотины 157
4.3.3. Водосбросные бетонные и железобетонные плотины 178
4.3.4. Контрфорсные плотины 188
4.3.5. Арочные плотины 194
4.4. Деревянные плотины 202
4.5. Тканевые плотины 208
Глава 5. ВОДОСБРОСНЫЕ СООРУЖЕНИЯ 212
5.1. Классификация, составные части и основные требования к проектированию 212
5.2. Открытые водосбросные сооружения 220
5.3. Закрытые водосбросные сооружения 234
5.3.1. Пропускная способность трубчатых и туннельных водосбросных сооружений 236
5.3.2. Действующий напор водосбросных сооружений, работающих в напорном режиме 236
5.3.3. Расчет входных оголовков 238
5.4. Резервные водосбросы 239
5.5. НБ водосбросных сооружений 242
5.5.1. Основные элементы крепления при донном режиме сопряжения 246
5.5.2. Основные конструкции креплений при поверхностном режиме сопряжения 251
5.5.3. НБ при сопряжении с отбросом струи 253
5.6. Размывы дна в НБ 255
Глава 6. МЕЛИОРАТИВНЫЕ КАНАЛЫ И ТРУБОПРОВОДЫ . . 260
6.1. Классификация и условия применения мелиоративных водоводов 260
6.2. Каналы. Особенности проектирования. Унификация сечений 262
6.3. Гидравлический расчет каналов 268
6.3.1. Назначение и состав расчетов 268
6.3.2. Допускаемые скорости потока в каналах . . . 272
6.3.3. Установившееся движение воды в каналах . . . 278
6.3.4. Неустановившееся движение воды в каналах . . 290
6.3.5. Особенности гидравлического расчета каналов при ледяном покрове 293
6.4. Фильтрация из каналов 294
6.4.1. Стадии фильтрации 294
6.4.2. Расчет фильтрационных потерь из каналов . . . 294
6.4.3. Основные типы одежд мелиоративных каналов . . 299
6.5. Трубопроводы. Особенности проектирования 308
6.6. Гидравлический расчет трубопроводов 309
6.7. Расчет трубопроводов на прочность 315
6.7.1. Расчет безнапорных асбестоцементных, бетонных и керамических трубопроводов 322
6.7.2. Расчет напорных асбестоцементных и железобетонных трубопроводов 324
6.7.3 Расчет стальных тонкостенных трубопроводов . . 326
6.7.4. Особенности расчета пластмассовых трубопроводов 328
Глава 7. СООРУЖЕНИЯ НА МЕЛИОРАТИВНОЙ СЕТИ 330
7.1. Классификация сооружений 330
7.2. Особенности проектирования сетевых сооружений . . . 332
7.3. Сооружения на мелиоративных каналах 343
7.4. Сооружения на лотковых каналах и лотково-трубчатой сети 350

7.5. Сооружения на трубопроводах 350
7.6. Сооружения на лиманах и польдерах 354
7.7. Противоэрозионные сооружения 355
7.8. Противоселевые сооружения 359
Глава 8. МЕХАНИЧЕСКОЕ ОБОРУДОВАНИЕ СООРУЖЕНИЙ . . 363
8.1. Назначение оборудования. Классификация 363
8.2. Поверхностные затворы 365
8.3. Глубинные затворы 371
8.4. Типизированные конструкции затворов для мелиоративных систем 375
8.5. Арматура трубопроводных систем орошения 386
8.6. Подъемно-транспортные устройства сооружений . . . 397
8.6.1. Конструкции и условия применения механизмов . 398
8.6.2. Соединения затворов и механизмов 405
8.7. Компоновка механического оборудования 410
8.8. Автоматизация маневрирования затворами 412
Глава 9. МЕЛИОРАТИВНЫЕ НАСОСНЫЕ СТАНЦИИ 413
9.1. Основные типы и схемы гидроузлов НС 413
9.2. Насосное оборудование мелиоративных НС 415
9.2.1. Параметры насосов и насосных установок . . . 415
9.2.2. Основные типы и марки насосов 416
9.2.3. Совместная работа насосов с сетью 428
9.2.4. Подбор насосных агрегатов 430
9.3. Конструкции и компоновка НС 433
9.3.1. Стационарные НС 433
9.3.2. Передвижные НС 436
9.4. НС закрытых оросительных систем с дождевальными машинами 436
9.4.1. Стационарные НС для закрытых оросительных систем с ДМ 436
9.4.2. Блочно-комплектные НС 442
9.4.3. Передвижные НС для закрытых оросительных систем с ДМ 443
9.5. НС осушительных и осушительно-увлажнительных систем 445
9.6. Особенности проектирования НС 452
9.7. Автоматизация управления работой НС 457
Предметный указатель 460

НИКОЛАЙ НИКОЛАЕВИЧ КРЕМЕНЕЦКИЙ,
ИГОРЬ СЕМЕНОВИЧ РУМЯНЦЕВ, БОРИС ВАСИЛЬЕВИЧ ОРЛОВ и др.

СПРАВОЧНИК. МЕЛИОРАЦИЯ И ВОДНОЕ ХОЗЯЙСТВО

4. СООРУЖЕНИЯ

Зав. редакцией **А. И. Гераськина**. Редактор **Н. М. Щербакова**. Художественный редактор **Н. А. Никонова**. Технический редактор **Н. Н. Зиновьева**. Корректор **Н. Я. Туманова**

ИБ № 3952

Сдано в набор 30.04.87. Подписано к печати 10.11.87. Т-16957. Формат 60×90¹/₁₆. Бумага типографская № 2. Гарнитура Литературная. Печать высокая. Усл. печ. л. 29,0. Усл. кр.-отт. 29,0. Уч.-изд. л. 34,48. Издат. № 40. Тираж 11 000 экз. Заказ № 999. Цена 1 р. 70 к.

Ордена Трудового Красного Знамени ВО «Агропромиздат», 107807, ГСП, Москва, Б-53, ул. Садовая-Спасская, 18.

Московская типография № 11 Союзполиграфпрома при Государственном комитете СССР по делам издательств, полиграфии и книжной торговли. 113105, Москва, Нагатинская ул., д. 1.