

УЧЕБНИКИ И УЧЕБНЫЕ ПОСОБИЯ ДЛЯ ВЫСШИХ
СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ

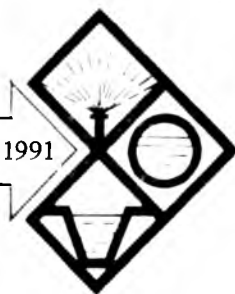
Б. М. Бахтин
С. Н. Корюкин

Гидротехнические сооружения

Допущено Главным управлением высших учебных заведений при Государственной комиссии Совета Министров СССР по продовольствию и закупкам в качестве учебного пособия для студентов высших учебных заведений по специальностям мелиоративного профиля



Москва ВО • Агропромиздат • 1991



ББК 38.778

Б30

УДК 626.8(075.8)

Редактор *Н. М. Щербакова*

Рецензент докт. техн. наук *В. С. Алтунин*
(Союзгипроводхоз)

Бахтин Б. М., Корюкин С. Н.

Б 30 Гидротехнические сооружения. — М.: Агропромиздат
1991. 351 с. (Учебники и учеб. пособия для высших сельскохозяйственных учебных заведений).

ISBN 5—10—000821—0

Даны сведения о характере и формах проявления взаимодействия водного потока с сооружением и его основанием. Рассмотрены наиболее распространенные конструкции, условия применения, достоинства и недостатки каждой из них. Приведены методы расчета речных и внутрисистемных гидротехнических сооружений.

Для студентов по специальностям мелиоративного профиля.

3308010000—293
Б $\frac{035(01)—91}{035(01)—91}$ 293—91

ББК 38.778

ISBN 5—10—000821—0

© Б. М. Бахтин, С. Н. Корюкин, 1991

ВВЕДЕНИЕ

Водные ресурсы. По количеству водных ресурсов СССР занимает первое место в мире. Протяженность речной сети, которая может быть использована для водохозяйственных целей, превышает 440 тыс. км. Средний годовой сток рек нашей страны составляет 4,7 тыс. км³, из которых более 80% приходится на реки северных районов и Сибири, хотя большая часть населения СССР проживает в европейской части страны. Таким образом, запасы пресной воды, необходимой для жизни человека, ограничены, и использование их должно быть разумным, так как потребность в воде систематически возрастает не только с ростом численности населения страны, но и в результате интенсификации хозяйственной деятельности человека. Крупными потребителями воды, кроме водоснабжения сельского и промышленного, являются мелиорация, промышленность, теплоэнергетика и другие отрасли народного хозяйства. Водный транспорт, гидроэнергетика также не могут развиваться без планового развития водного хозяйства.

Отрасль *водное хозяйство* — это совокупность мероприятий, направленных на изучение природных водных ресурсов, использование их на нужды народного хозяйства и на борьбу с вредными проявлениями водной стихии.

Инженерные сооружения, посредством которых осуществляются те или иные водохозяйственные мероприятия, называют *гидротехническими сооружениями*.

Гидротехнические сооружения и их особенности. Гидротехнические сооружения по сравнению с другими сооружениями имеют следующие особенности: подвержение воздействию воды, то есть работают они в постоянном контакте с движущейся или покоящейся водой. Эти воздействия бывают механические (гидростатический напор), динамические (истирание поверхности сооружения твердыми частицами, содержащимися в воде, и др.), физико-химические (растворение и вынос солей из грунтовых сооружений, в основаниях сооружений, выщелачивание бетона и др.) и биологические;

строительные условия: гидротехнические сооружения, возводимые на реках, строят в особых природных условиях, то есть при производстве работ необходимо решать вопрос о пропуске расходов реки в период строительства; индивидуальность гидротехнических сооружений — возведение их в различных климатических, топографических, гидрогеологических и инженерно-геологических условиях (особенно речные). Это не исключает использования метода аналогий при выборе типов сооружений, а также широкого применения типовых проектов, созданных из унифицированных деталей и узлов (при проектировании сооружений на оросительной или осушительной сети);

влияние на прилегающие территории — затопление больших площадей крупными гидроузлами с водохранилищами, подтопление (подъем уровня грунтовых вод), распространяющееся на значительные территории. Скопление больших масс воды (объемы отдельных водохранилищ достигают десятков миллиардов кубометров) приводит к изменению климата прилегающих территорий. Эту особенность гидросооружений необходимо учитывать при проектировании гидроузлов и отдельных сооружений, добиваясь, чтобы разработки не только не ухудшали имеющиеся экологические условия, но и улучшали их.

В мировой гидротехнической науке и практике общеизвестны достижения советских гидротехников, разработавших целый ряд прогрессивных инженерных решений. К ним можно отнести:

разработку системы типовых проектов, позволяющих широко использовать унифицированные детали и узлы при проектировании и строительстве сооружений на оросительной и осушительной сети; большую работу по их унификации;

разработку новых методов борьбы с фильтрацией из каналов, обеспечивающих охрану окружающей среды от подъема уровней грунтовых вод на прилегающих территориях; усовершенствованные облицовки каналов могут быть использованы в сложных геологических условиях, например в условиях пучинистых грунтов;

широкое развитие в нашей стране плотин из грунтовых материалов на слабых основаниях и многолетней мерзлоте; использование при возведении плотин из грунтовых материалов методов гидромеханизации (намыва, а также отсыпки грунтов в воду и направленным взрывом);

разработку новых типов и конструкций водозаборных сооружений для различных условий, учитывающих особенности гидравлической структуры потока; режима наносов, льда, шуги;

создание совершенных типов и конструкций сооружений на каналах: лотки, регуляторы, трубы, дюкеры, акведуки, быстротоки, перепады, в том числе и с применением сборного железобетона;

проведение и создание рациональных конструкций водосбросных сооружений и их элементов с учетом явлений аэрации, кавитации и кавитационной эрозии, образования «катящихся волн», размывов нижнего бьефа (НБ);

разработку рациональных типов гидротехнических затворов как для больших напоров, так и для малых, с обеспечением автоматизации управления последними;

разработку эффективных методов регулирования речных русел (в том числе и с использованием искусственной поперечной циркуляции) и новых типов регуляционных сооружений;

усовершенствование существующих конструкций и создание новых для гидротехнических сооружений из дерева, синтетических и других материалов. Накоплен также большой опыт по строительству высоконапорных бетонных и железобетонных плотин на скальных и нескальных основаниях; по разработке сейсмостойких конструкций и гидротехнических сооружений; по разработке сооружений рыбохозяйственного назначения; по использованию современных методов расчета (конечных элементов, конечных разностей и др.).

Успехи советского гидротехнического строительства обеспечиваются достижениями советской науки, подготовкой квалифицированных кадров.

Глава 1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О ГИДРОТЕХНИЧЕСКИХ СООРУЖЕНИЯХ

1.1. ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ ГИДРОТЕХНИКИ

Гидротехника — это отрасль науки и техники, направленная на изучение водных ресурсов, их использование и борьбу с вредным воздействием вод.

Основная задача гидротехники — приспособление (а в необходимых случаях и изменение) существующего естественного режима водного объекта — реки, озера, моря, подземных вод — к нуждам народного хозяйства при обеспечении минимума отрицательных экологических последствий.

Инженерные (искусственные) сооружения, позволяющие реализовать поставленную задачу, называют *гидротехническими сооружениями*.

1.2. КЛАССИФИКАЦИЯ ГИДРОТЕХНИЧЕСКИХ СООРУЖЕНИЙ

По целевому назначению. Каждая из отраслей водного хозяйства имеет свою специфическую цель: так, гидромелиорация должна обеспечить оптимальный для данных природно-климатических условий водно-воздушный режим в почвенном слое; гидроэнергетика — преобразование потенциальной энергии воды в энергию электрическую; водный транспорт — создание необходимых судоходных глубин в водотоке, условий для обеспечения движения и отстоя судов и плотов, погрузки и разгрузки судов. Для водоснабжения такой целью является обработка воды, чтобы придать ей необходимые качества (ограничения по содержанию механических примесей, солей, бактерий, цвету, запаху), и распределение ее между потребителями. Специфика канализации — сбор и очистка использованной воды для повторного ее использования или возвращения в водоисточник. При использовании водных недр, например, с целью рыборазведения возникает необходимость создать оптимальные условия для развития рыбного стада и последующего отлова рыбы. На стадии технологического процесса, реализующей конечные, специфические цели той или иной отрасли, используют гидротехнические сооружения, называемые *специальными*. При су-

ественных различиях отрасли водного хозяйства имеют и много общих задач. Это — необходимость накопления воды в паводковый период для последующего использования в маловодье, регулирование уровней и расходов воды в водотоках, транспортирование воды к месту ее использования или потребления. Гидротехнические сооружения, с помощью которых решают эти задачи, называют *общими*.

По виду источника или водотока. Гидротехнические сооружения классифицируют на речные, морские, озерные или прудовые, внутрисистемные или сетевые и подземные. Внутрисистемные сооружения строят на системах искусственных русл — каналов с целью регулирования расходов и уровней в них, пропуска воды при резком изменении высотного положения канала. Подземные сооружения служат для забора воды из подземных источников.

По условиям взаимодействия с водотоком. Сооружения могут быть разделены на изменяющие естественный режим водотока и создающие искусственные водные потоки.

По характеру выполняемых функций первые подразделяют на водоподпорные, водопропускные и руслорегулирующие. Ко вторым относятся водопроводящие сооружения. Промежуточными между двумя указанными категориями являются водозаборные сооружения.

Водоподпорные сооружения, перегораживающие водосток и вызывающие подъем уровня воды в нем, называют плотинами (см. рис. 1.1, б), а ограждающие какую-либо территорию от затопления водой — дамбами. Такие сооружения испытывают неодинаковое давление воды с разных сторон. Участок водотока с более высокой отметкой уровня воды, примыкающей к подпорному сооружению, — *верхний бьеф* (ВБ), с более низкой — *нижний бьеф* (НБ). Разницу отметок уровней ВБ и НБ называют *напором на сооружении*. При большой емкости ВБ в нем можно задержать часть воды, проходящей по водотоку в период паводка, с тем чтобы использовать эту воду в маловодный период. В этом случае ВБ называют *водохранилищем*.

Водопропускные сооружения служат для сброса «излишней» воды (в период паводка), которая не может быть размещена в водохранилище, и их называют *водосбросами* (см. рис. 1.1, в), а также для подачи воды из водохранилища в НБ — *водовыпуски* и *водоспуски*.

Руслорегулирующие сооружения предназначены для регулирования взаимодействия потока с руслом: предотвращения размыва берегов и дна, отложения наносов.

Водопроводящие сооружения подают воду от места ее забора из водоисточника к потребителю (каналы, трубопроводы, лотки и т. д.).

Водозаборные сооружения, забирая воду из водоемисточника и подавая ее в канал или трубопровод, изменяют тем самым естественный режим водотока, одновременно являясь головными сооружениями, создающими искусственный водный поток.

По условиям использования. Гидротехнические сооружения подразделяют на *постоянные* и *временные* (необходимые лишь в период строительства или ремонта объекта).

Постоянные гидротехнические сооружения разделяют в зависимости от народнохозяйственного значения объектов и с учетом последствий от их аварии или нарушения их эксплуатации на четыре класса — I...IV (СНиП II-50—74). К IV классу относят и временные сооружения.

В первый класс входят наиболее крупные плотины и ГЭС, авария которых могла бы привести к тяжелым человеческим жертвам или большому экономическому ущербу. Вполне естественно, что при проектировании сооружений более высокого класса в их конструкцию закладывают большие запасы прочности.

1.3. ОСОБЕННОСТИ ГИДРОТЕХНИЧЕСКИХ СООРУЖЕНИЙ

Главная особенность гидротехнических сооружений — постоянное взаимодействие с водным потоком. Влияние водяного потока на сооружение и его основание многообразно: механическое воздействие, физико-химическое и биологическое воздействие воды на материал самой конструкции и грунт основания, влияние биологических факторов на работу объекта. Поясним это на примере плотин.

Механическое воздействие. Оно проявляется в виде статического давления на напорную и низовую грани — силы W_1 и W_2 (рис. 1.1, а) и подошву плотины — сила W_3 .

Разница уровней воды в ВБ и НБ (напор H) является причиной возникновения фильтрационных потоков в теле сооружения и под ним — в основании. Движущийся поток оказывает динамическое давление на подошву плотины — сила W_f .

Все эти силы, приложенные к поверхности малопроницаемого сооружения, стремятся поднять и сдвинуть его в сторону НБ.

При движении фильтрационного потока, например, в песчаных грунтах возникают силы F (рис. 1.1, б), приложенные к взвешенным в воде Архимедовой силой A частицам и стремящиеся вынести их за пределы грунтового массива. Если силы трения между частицами меньше сил F , то мелкие песчинки движутся в порах между более крупными — происходит суффозия. Результирующая сил F , приложенных к отдельным части-

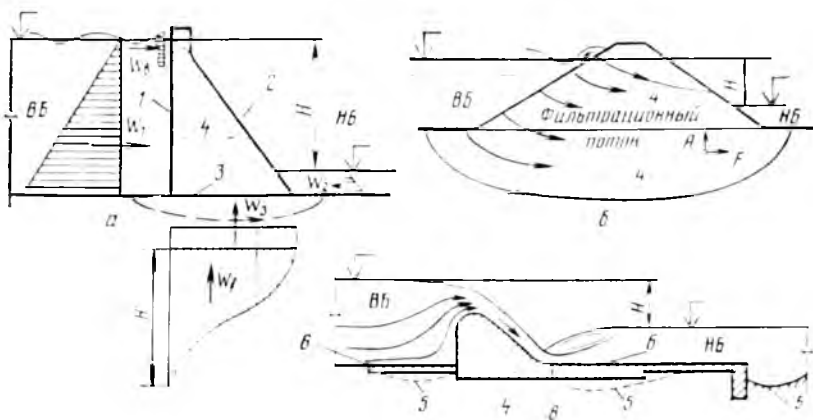


Рис. 1.1. Виды воздействия водного потока на подпорные сооружения — плотины:

а — на глухую бетонную; *б* — на плотину из грунтовых материалов; *в* — при сбросе воды через плотину; 1 — напорная грань; 2 — низовая грань; 3 — подошва плотины; 4 — зона насыщения фильтрующейся водой; 5 — зона размыва дна; б — элементы крепления; *H* — напор на плотине

цам, стремится сдвинуть массив грунта, в котором распространяется фильтрационный поток.

Действие поверхностного потока на бетонную водосливную плотину показано на рисунке 1.1, *а*. В ВБ вблизи сооружения происходит местное увеличение скорости, что может вызвать размыв дна и требует устройства дополнительного крепления. При переливе через плотину скорость потока по мере его падения возрастает и в НБ, непосредственно у сооружения, многократно превосходит скорость, безопасную для грунта основания. Глубина размыва здесь может достигать нескольких и даже десятков метров, при этом возникает опасность сползания сооружения в образовавшуюся воронку. Для предотвращения этого часть НБ, прилегающая к плотине, должна быть надежно укреплена так, чтобы отодвинуть воронку размыва на расстояние, при котором она не представляла бы опасности для сооружения.

Двигаясь по водосливной поверхности с большими скоростями, поток, насыщенный взвешенными частицами грунта, оказывает на бетон истирающее, абразивное действие. Иногда для предотвращения истирания приходится облицовывать бетонную поверхность природным прочным камнем и даже металлическими блоками.

Разновидность механического — волновое воздействие, которое особенно значительно в крупных водоемах. Действие волны проявляется в виде волновой нагрузки W_v (см. рис. 1.1, *а*)

на поверхность жесткого неразмываемого сооружения. Набегая на размываемый грунтовой откос (см. рис. 1.1, б), волна расходует накопленную энергию на местный размыв его.

В суровых климатических условиях значительные нагрузки на сооружение возникают при образовании на поверхности воды ледового покрова. Ледяное поле может, расширяясь при увеличении температуры воздуха, давить на сооружение, а движущиеся льдины оказывают на него динамическое воздействие.

При возможности попеременного промерзания и оттаивания бетона активно протекает процесс выветривания, если значительная часть бетонной конструкции насыщена водой (рис. 1.1, а — зона 4, в которой распространяется фильтрационный поток). Расширяясь при замерзании в порах бетона, вода приводит к появлению микротрещин и ухудшению прочностных его качеств. Одним из видов его является выветривание.

Физико-химическое воздействие. Другой его вид — химическая суффозия — вымывание фильтрационным потоком растворимых солей, содержащихся в грунте или бетоне. Это вызывает образование в грунте каверн и сквозных ходов фильтрации, сопровождающееся потерей его несущей способности, ухудшает прочностные свойства бетона.

Водный поток, взаимодействуя с металлом сооружений, активизирует коррозионные процессы, а растворенные в нем соли и щелочи провоцируют коррозию бетона.

Биологическое воздействие. В наибольшей степени оно опасно для деревянных сооружений в зоне колебаний уровня воды. Переменное намокание и высыхание приводят к интенсивному развитию гниения древесины. Другой пример биологического воздействия — бурное развитие водорослей в каналах и ВБ, приводящее к уменьшению пропускной способности каналов и ухудшению качества воды в водохранилищах.

Отличительная особенность большинства гидротехнических сооружений — возведение в руслах и на поймах рек, в прибрежных зонах морей и озер, что сопряжено с необходимостью отвода воды и осушения стройплощадок. Часто затраты на эти мероприятия соизмеримы со стоимостью строительства самого объекта.

Крупные гидротехнические сооружения не могут не влиять на экологическую обстановку в районе их возведения. Например, строительство плотины изменяет естественный режим расходов и уровней воды в реке и, как следствие, — условия жизни рыб и других обитателей водной среды. Создание крупных водоемов, площади которых могут достигать нескольких тысяч квадратных километров, связано с затоплением, как правило, плодородных пойменных земель, месторождений полезных ис-

копаемых, переносом населенных пунктов и городов, уменьшением глубины залегания грунтовых вод на прилегающей территории и даже заметным изменением климатических условий — повышением влажности, понижением летних и ростом зимних температур. Особенно велико влияние крупных водохранилищ на равнинных реках, крупных каналов. Поэтому решение о возведении подобных сооружений принимают после детального эколого-экономического анализа последствий, в том числе и отдаленных, этого строительства.

Часто крупные объекты возводят в горных районах, где возможны глубоководные водохранилища большого объема с относительно малой площадью зеркала. Для создания таких водохранилищ строят плотины высотой до 300 м и более, туннели длиной в десятки километров и площадью поперечного сечения 100 м² и более, другие уникальные сооружения.

1.4. ГИДРОУЗЛЫ И ГИДРОСИСТЕМЫ

До сих пор мы говорили об отдельных видах гидротехнических сооружений, не связывая их друг с другом. В реальных условиях изолированная работа любого из них невозможна. Действительно, трудно представить плотину, перегораживающую реку, но не имеющую устройств для пропуска воды из ВБ в НБ. Столь же нелепо выглядел бы канал, не снабженный сооружениями для забора необходимого расхода воды из реки и распределения этого расхода между потребителями. Цель объектов гидротехнического строительства — не «создать водохранилище», а «обеспечить перераспределение стока реки во времени и его использование». Поэтому возводимые объекты включают не одно, а несколько гидротехнических сооружений разного назначения, решающих комплекс поставленных задач. Совокупность гидротехнических сооружений, объединенных общностью целей и расположенных на небольшой территории, называют *гидроузлом*.

Как и сооружения, гидроузлы принято классифицировать по ряду признаков. По месторасположению их подразделяют на речные, морские, озерные и прудовые.

По величине создаваемого напора они могут быть безнапорными (при заборе воды из рек в их естественном состоянии, портовые сооружения и др.), низконапорными (напоры менее 10 м), средне- (напор 10...50 м) и высоконапорными (напоры более 50 м).

По основному назначению гидроузлы подразделяют на водозаборные (для орошения, водоснабжения и др.), энергетические, водно-транспортные, водохранилищные (для перераспределения стока рек), а также рекреационные, служащие для

организации отдыха населения. Как правило, средне- и высоконапорные гидроузлы одновременно решают несколько задач. Так, с созданием водохранилища Днепровского гидроузла им. В. И. Ленина (напор около 36 м) были затоплены днепровские пороги, что сделало возможным судоходство в верхнем течении р. Днепр. В составе гидроузла работают две ГЭС общей мощностью более 1,5 млн кВт, а запасы воды в его водохранилище позволили оросить дополнительно тысячи гектаров плодородных земель.

Комплексное, многоцелевое использование водных ресурсов приводит к возникновению противоречий между участниками водохозяйственного комплекса. Накопление воды в период паводка нарушает гидрологический режим реки ниже гидроузла, приводя к обсыханию нерестилищ и ущербу для рыбного хозяйства. Необходимость поддержания судоходных глубин в НБ требует подачи туда дополнительных расходов воды, снижая выработку электроэнергии ГЭС. Вода, подаваемая из водохранилища на орошение, также не может быть использована на ГЭС. В этих условиях согласование интересов всех участников водохозяйственного комплекса с учетом требований охраны природы — сложная инженерно-экономическая проблема, изучаемая в курсе «Комплексное использование водных ресурсов».

Приведенные примеры показывают, что гидроузлы чаще всего перераспределяют сток реки во времени. Территориальное перераспределение водных ресурсов реализуют с помощью *гидросистем* — комплекса гидроузлов и отдельных сооружений, объединенных общностью целей и расположенных на значительной территории.

Гидросистемы, как и гидроузлы, могут быть специализированными и комплексными. Среди специализированных систем можно отметить системы водоснабжения — групповые водопроводы, получившие широкое распространение в нашей стране, гидромелиоративные системы. Пример транспортной системы — Волго-Балтийский путь, энергетической — Севано-Разданский каскад ГЭС в Армении.

Классической комплексной гидросистемой является канал им. Москвы длиной 128 км для переброски части стока р. Волга в бассейн р. Москва. Сооружали его для водоснабжения г. Москвы. Вместе с тем, канал — это крупная транспортная артерия, воду его используют для орошения прилегающих территорий, а берега канала и его водохранилищ являются зоной отдыха трудящихся Москвы и Подмосковья. Кроме того, восемь гидроэлектростанций канала вырабатывают дешевую электроэнергию.

Гидросистемы, занимая большие территории и решая комплекс задач, не могут не влиять на экологическую обстановку в

регионе. Ошибки в проектировании, строительстве и эксплуатации таких объектов приводят к тяжелым экономическим и экологическим последствиям. В Узбекистане, например, на площади 800 тыс. га произошло вторичное засоление и заболачивание орошаемых земель, а из-за интенсивного отбора воды в дельте р. Аму-Дарья 1,3 млн га превратились в пустыни. При создании крупных гидросистем неизбежны отрицательные последствия. Так, система Волжских гидроузлов с общей установленной мощностью ГЭС более чем 8,6 млн кВт позволила обеспечить интенсивное промышленное развитие европейской части страны, создать мощные оросительные системы на многих тысячах гектаров ранее засушливых земель, однако при этом были затоплены и подтоплены тысячи гектаров плодородных, уже освоенных земель в пойме реки, нанесен значительный ущерб рыбному хозяйству. Перерегулирование стока р. Волга, переброска его части в бассейн рек Москва и Дон, забор воды на орошение заметно изменили гидрологический режим Каспийского моря, его экосистемы. Именно поэтому возведению крупных гидросистем и узлов должен предшествовать детальный экономический анализ всех положительных и отрицательных аспектов такого строительства, включая оценку ущерба, наносимого окружающей среде, и стоимость природоохранных мероприятий.

1.5. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О ПРОЕКТИРОВАНИИ ГИДРОТЕХНИЧЕСКИХ СООРУЖЕНИЙ

Проектирование — наиболее важный этап в создании любого гидротехнического объекта, определяющий как ход его строительства, так и последующую эксплуатацию. Проектирование основывается на данных изысканий — топографических, гидрологических, геологических и гидрогеологических. При проведении изысканий анализируют также данные по климатическому режиму района, изучают ихтиологическую обстановку водотока, почвы и растительность прилегающих территорий (последнее имеет особое значение для объектов гидромелиорации) и др.

С учетом множественности факторов, влияющих на конструкцию будущего объекта, на предварительной стадии проектирования рассматривают несколько технически целесообразных вариантов. Окончательное решение принимают на основе экономического анализа с обязательным учетом социальных и экологических последствий строительства. При такой технологии проектирование является индивидуальным, требует больших затрат сил и времени, что оправданно при разработке крупных объектов. При проектировании относительно неболь-

ших сооружений в простых инженерно-геологических условиях широко применяют ранее разработанные типовые проекты. Это характерно для объектов гидромелиоративного строительства с большим числом часто повторяющихся малых гидротехнических сооружений.

Расчетное обоснование проектных предложений включает гидравлические и фильтрационные расчеты по обеспечению пропускной способности водопропускных сооружений и надежной работы объекта и его основания при их взаимодействии с поверхностным и фильтрационным потоками. Эти расчеты подробно изложены в специальных курсах гидравлики. Выполняют также статические и динамические расчеты прочности и устойчивости. Достоверность расчетов гарантирует безопасную работу объекта в течение всего срока его эксплуатации. Их выполняют с учетом всех *силовых воздействий и нагрузок на сооружение*, которые подразделяют на *постоянные* (вес сооружения, статическое давление воды и т. д.) и *временные*. Последние бывают длительно действующие (фильтрационное давление, температурные воздействия и др.), кратковременные (давление волн, плывущего льда и т. д.) и особые, действующие лишь в исключительных условиях (сейсмические нагрузки, давление волн в катастрофических ситуациях и т. п.).

В расчетах учитывают два вида сочетания нагрузок — *основное и особое*. К основному относят постоянные и временные нагрузки, к особому — постоянные, временные и, как правило, одну из особых.

Расчеты на указанные сочетания нагрузок осуществляют в соответствии с методом предельных состояний по двум их группам: непригодности к эксплуатации (потеря устойчивости или разрушение сооружения или его элементов) или непригодности к нормальной эксплуатации (обычно это расчет на деформации, перемещения и раскрытие трещин), когда состояние конструкции затрудняет эксплуатацию объекта и требует проведения ремонта.

1.6. СТАДИИ И ВИДЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ, НОРМАТИВНЫЕ ДОКУМЕНТЫ

Объекты гидротехнического строительства проектируют в одну или две стадии. Одностадийное проектирование характерно для относительно несложных в техническом отношении сооружений, где возможно строительство по типовым проектам или проектам повторного применения. Итог одностадийного проектирования — рабочий проект со сводным сметным расчетом стоимости. Более крупные и сложные объекты проектируют в две стадии: на первой выполняют технический проект со

сводным сметным расчетом стоимости, на второй — рабочую документацию со сметами.

Основой для разработки проектов являются обосновывающие материалы: схемы развития и размещения отраслей народного хозяйства, региональные схемы развития и размещения производительных сил и др. Для уникальных объектов выполняют дополнительное технико-экономическое обоснование (ТЭО), подтверждающее техническую возможность и экономическую целесообразность объекта.

В ходе индивидуального проектирования крупных гидротехнических объектов, когда существующие методы расчета не позволяют получить достаточно надежные результаты, прибегают к модельным исследованиям. Проведение таких исследований обязательно для сооружений I класса.

Для гидротехнического строительства с его многовариантностью проектных решений и множественностью критериев особое значение имеют системы автоматизированного проектирования (САПР), базирующиеся на широком применении ЭВМ и позволяющие проектировщику быстро сопоставить большое число вариантов, выбрать из них технически и экономически целесообразные.

Нормативная основа проектирования и строительства гидротехнических объектов — строительные нормы и правила (СНиП), являющиеся законом, обязательным для всех видов строительства. СНиП разделены на пять частей: 1 — организация, управление, экономика; 2 — нормы проектирования; 3 — организация производства и приемка работ; 4 — сметные нормы и 5 — нормы затрат материалов и трудовых ресурсов.

В нормах проектирования (часть 2 СНиП) обычно приводят наиболее важные положения расчетов и конструирования сооружений. В развитие и детализацию положений СНиП министерства и ведомства могут разрабатывать ведомственные нормативные документы (ТУиН — технические условия и нормы, Указания по расчетам отдельных сооружений и т. д.). Эти документы обязательны для применения лишь в организациях данного ведомства, но их могут использовать и другие проектные учреждения.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Каковы цели и задачи гидротехники?
2. Чем отличаются гидросооружения специальные от сооружений общего назначения?
3. Каково назначение водоподпорных сооружений? Что такое напор на сооружение?
4. Какие другие типы гидросооружений Вы знаете?
5. Каковы формы взаимодействия гидросооружения с водной средой?

6. В чем отличие между понятиями «гидротехническое сооружение, гидроузел и гидросистема»?
7. Каково влияние крупных гидроузлов и гидросистем на окружающую среду?
8. Какие нагрузки действуют на подпорное гидросооружение?

Глава 2. ФИЛЬТРАЦИЯ В ОСНОВАНИЯХ ГИДРОТЕХНИЧЕСКИХ СООРУЖЕНИЙ И В ОБХОД ИХ

2.1. ФИЛЬТРАЦИЯ В НЕСКАЛЬНЫХ ОСНОВАНИЯХ

2.1.1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О ФИЛЬТРАЦИИ

Движение жидкости (газа) в пористой или трещиноватой среде называют фильтрацией. В гидротехнических сооружениях движение фильтрационного потока может быть в одних случаях безнапорным (например, фильтрация через плотины из грунтовых материалов, когда фильтрующийся поток имеет «свободную» поверхность), в других случаях — напорным (фильтрационный поток движется в основании напорного сооружения — плотины, регулятора на канале и др., оказывая взвешивающее воздействие на основание сооружения). В данной главе рассматривается напорная фильтрация, а безнапорная — в главе 4 (раздел «Плотины из грунтовых материалов»).

Фильтрационный поток в основании сооружения движется под воздействием гравитационных сил, то есть разностей уровней верхнего и нижнего бьефов (рис. 2.1).

Водопроницаемость грунтов нескальных оснований характеризуется коэффициентом фильтрации K , который в фильтрационных расчетах обычно принимают для имеющегося грунта постоянным.

В естественном состоянии грунты состоят из частиц различной крупности. В фильтрационных расчетах применяют обобщенные характеристики грунтов в виде интегральных кривых гранулометрического (зернового) состава, где частицы распределены по фракциям в процентах от общей массы образца. На основе этих кривых в расчетах используют характерные показатели грунтов, например:

коэффициент неоднородности

$$K_{60, 10} = d_{60}/d_{10}, \text{ или } K_{60, 10} = D_{60}/D_{10};$$

коэффициент межслойности

$$D_{50}/d_{50},$$

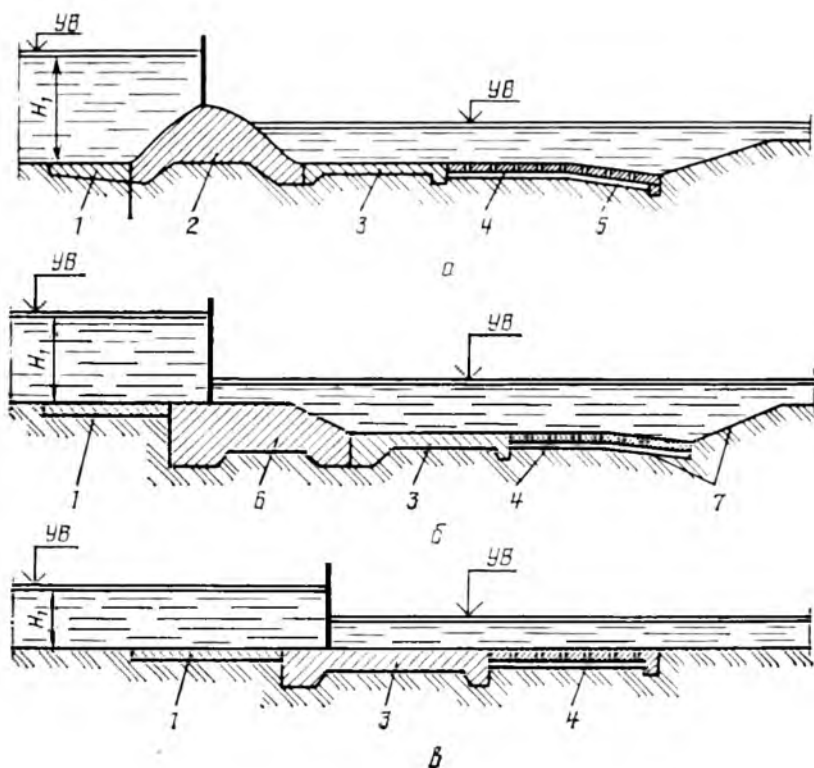


Рис. 2.1. Элементы флютбета:

а, б — сооружения высоко- и средненапорные; в — низконапорные; 1 — понур; 2 — тело плотины; 3 — водосбой; 4 — рисберма; 5 — концевой участок; 6 — водосливной порог; 7 — ковш

где параметр d характеризует диаметр частиц рассматриваемого грунта, мм, а D — то же, контактирующего с ним слоя грунта, мм; d_{60} , d_{50} , d_{10} , D_{60} , D_{50} , D_{10} — диаметры частиц грунта, взятые с кривых гранулометрического состава, содержащие по массе соответственно 60, 50, 10% частиц, мм; D_{10} и d_{10} принято называть действующими, или эффективными, а D_{60} и d_{60} — контролирующими.

Если $K_{60,10} \leq 3$, то грунт считают однородным, если $K_{60,10} \geq 3$ — неоднородным.

2.1.2. ФЛЮТБЕТ И ЕГО СОСТАВНЫЕ ЧАСТИ

Флютбет — совокупность элементов напорного гидротехнического сооружения, воспринимающих напор воды и обеспечивающих его устойчивость, а также организованный и безопасный пропуск расходов реки (канала) и фильтрационного потока под ним и в обход. В речных высоко- и средненапорных соору-

жениях составными элементами флютбета являются (см. рис. 2.1, а) понур, тело плотины, водобой и рисберма, включающая концевую часть (ковш и др.); в сооружениях малого напора тело плотины может быть заменено низкорасположенным порогом, а в сооружениях на каналах порог и водобой объединены в единую плиту, в этом случае флютбет состоит из понура, водобоя и рисбермы с концевой частью (см. рис. 2.1, в). Понур, водобой и рисберма принимают водонепроницаемым, а рисберму — водопроницаемой. При необходимости в состав флютбета могут входить шпунты.

Поверхность контакта между грунтом основания сооружения и подошвой флютбета называют *подземным контуром* сооружения.

При определении сил, действующих на флютбет, для расчета его прочности и устойчивости принимают те же силы, что действуют на подпорное сооружение (см. гл. 1). Дополнительно рассчитывают фильтрационные силы, которые возникают при движении фильтрационного потока под сооружением от верхнего бьефа (ВБ) к нижнему бьефу (НБ), и взвешивающие, которые появляются в связи с тем, что флютбет погружен в воду.

Вертикальную составляющую фильтрационных сил называют *фильтрационным противодавлением*, а взвешивающую силу, действующую, по Архимеду, на погруженный в жидкость флютбет, — *взвешивающим противодавлением*. Обе разновидности противодействия направлены вертикально вверх и способствуют всплыванию флютбета.

Фильтрационное и взвешивающее противодействия графически (рис. 2.2) изображают в виде эпюр, которые строят на горизонтальную проекцию флютбета (эпюры противодействия). Ординаты эпюры фильтрационного противодействия находят расчетом, а взвешивающего противодействия — элементарным графическим построением (см. рис. 2.2, б). По этим эпюрам можно определить силу противодействия как суммарную площадь эпюр, умноженную на удельный вес воды и ширину флютбета (обычно принимаемую за единицу).

2.1.3. ПРЕДПОСЫЛКИ ФИЛЬТРАЦИОННЫХ РАСЧЕТОВ

Задача фильтрационного расчета — ответить на следующие вопросы.

1. Каков характер фильтрационного потока (безнапорный, напорный) в основании сооружения?

2. Какими количественными показателями (градиенты напора, расход фильтрационного потока) характеризуется фильтрационный поток?

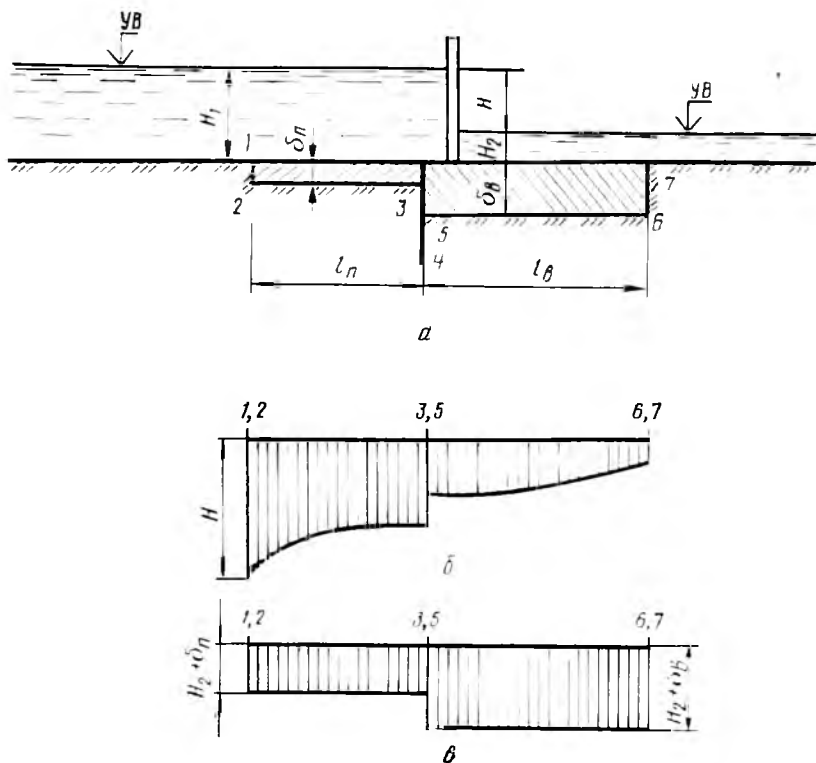


Рис. 2.2. Эпюры силовых воздействий на подземный контур сооружения: а — продольный разрез по водоподпорному сооружению; б, в — эпюры соответственно фильтрационного и взвешивающего давления на развернутый контур флюتبета

3. Какое давление оказывает фильтрационный поток вместе со взвешивающим противодействием на флютбет сооружения?

4. Каковы должны быть размеры флюتبета, чтобы обеспечить его устойчивость на всплытие и сдвиг и устойчивость грунта основания от проявления опасных фильтрационных деформаций, также влияющих на устойчивость сооружения?

Ответ на первый вопрос для подпорных сооружений (плотины бетонные, регуляторы, судоходные шлюзы и др.) однозначен, здесь мы имеем дело с напорной фильтрацией. Отметим уровни ВБ и НБ обычно изменчивы во времени, поэтому фильтрационные расчеты выполняют, как правило, для постоянного расчетного напора — разности отметок уровней ВБ и НБ. Это обычно нормальный подборный уровень (НПУ) ВБ и минимальный уровень НБ.

За расчетный напор фильтрационного потока принимают разность отметок уровней ВБ и НБ относительно некоторой горизонтальной плоскости, за которую обычно принимают плоскость, проходящую по уровню или по дну НБ, если в расчетный период уровень воды в нем соответствует уровню дна (глубина в НБ равна нулю).

Основные предпосылки (допущения), принимаемые для фильтрационных расчетов, следующие:

рассматривают плоскую задачу (плоское движение);

грунт основания принимают однородным во всех направлениях (однородно-изотропным);

движение фильтрационного потока считают установившимся, то есть напор в заданной точке не меняется во времени;

коэффициент фильтрации, температура, пористость грунта не изменяются во времени;

Элементы подземного контура сооружения считают водонепроницаемыми.

2.1.4. МЕТОДЫ ФИЛЬТРАЦИОННЫХ РАСЧЕТОВ

Фильтрационные расчеты позволяют проверить устойчивость флутбета и фильтрационную прочность грунта основания, определить расход фильтрационного потока.

Движение фильтрационного потока подчиняется закону Дарси

$$v = Ki \quad \text{и} \quad Q = Sv - SKi = KS(H/l),$$

где v — скорость фильтрации, м/с; K — коэффициент неоднородности; i — градиент напора (потери напора фильтрационного потока на единицу длины в направлении движения потока), $i = H/l$ (H — действующий напор; l — длина пути фильтрации, м); Q — расход фильтрации, м³/с; S — площадь поперечного сечения, м².

Ниже рассмотрены основные группы методов фильтрационных расчетов.

Методы гидромеханики. Они включают различные методы интегрирования уравнения Лапласа, которому соответствует движение фильтрационного потока, когда его рассматривают с позиции математической физики. Полученные точные решения для различных очертаний подземного контура (в основном простых форм) позволяют определить все параметры фильтрационного потока. Построение гидродинамической сетки вручную является упрощенным способом решения уравнения движения фильтрационного потока.

Экспериментальные методы. Метод электрогидродинамических аналогий (ЭГДА) наиболее широко распространен для решения задач фильтрации не только для условий плоской за-

дачи, но и для пространственной. В этом случае по результатам исследований строят гидродинамическую сетку движения для любых очертаний подземного контура.

Экспериментальные методы исследований фильтрации проводят также на моделях гидротехнических сооружений, в грунтовых лотках, используя принципы моделирования. В гидроинтеграторе — щелевом лотке используют аналогию между фильтрацией в грунте и через тонкую щель, образованную двумя параллельными стенками, в которую заложен флютбет.

Гидравлические методы. Наиболее распространены в практических расчетах (некоторые из них входят в нормативные документы) и основаны на приближенном решении задачи фильтрации.

В экспериментальном методе ЭГДА используют аналогию между движением электрического тока в токопроводящей среде и стационарным движением фильтрационного потока в пористой среде. Оба эти вида движения (как и движение теплового потока в однородной среде) подчиняются уравнению Лапласа.

Электрическая модель (прибор ЭГДА) представляет исследуемую область в определенном линейном масштабе, в которой коэффициент электропроводности пропорционален коэффициенту фильтрации и соблюдены граничные условия. Водопроницаемым грунтом в приборе ЭГДА является электропроводящая бумага (или раствор электролита или фольга).

В электропроводной бумаге подземный контур вырезан в соответствующем масштабе (в растворе он из электроизоляционного материала). На участках, примыкающих к флютбету с обеих сторон, соответствующих входу и выходу фильтрационного потока, присоединены шины. Создается электрическая цепь, включающая питательную ветвь с присоединенным источником постоянного тока, ключом, реохордом, вольтметром и амперметром, и измерительная (реохорд с подключенным гальванометром), а также проводник с иглой на конце. Прибор работает по принципу моста Уитстона.

При помощи щупа-иглы в области фильтрации (то есть на токопроводной бумаге) отыскивают точки равного потенциала и по ним строят линии равных потенциалов, что в натуре соответствует линиям равных напоров. Затем перпендикулярно линиям равных потенциалов строят линии токов таким образом, чтобы образующаяся гидродинамическая сетка состояла бы из подобных фигур, обычно квадратов (рис. 2.3).

Семейство линий, соединяющих ВБ и НБ (вход в область фильтрации и выход из нее), называют линиями токов; линии, перпендикулярные им, соединяющие водоупор с подземным контуром сооружений, — линиями равных напоров.

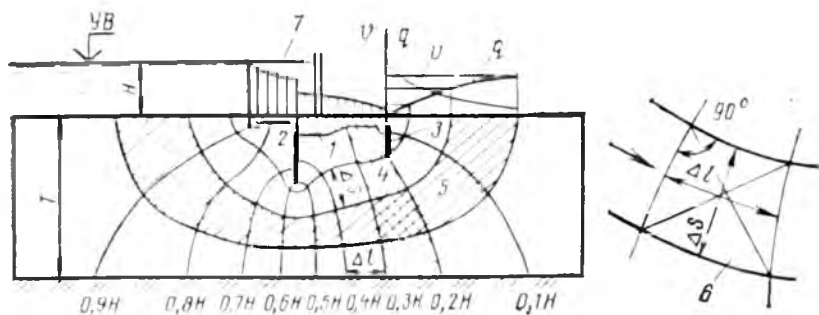


Рис. 2.3. Гидродинамическая сетка:

1 — флютбет; 2, 3 — шпунтовые стенки; 4 — пояс давления; 5 — лента расхода; 6 — отдельный квадрат сетки; 7 — эпюра противифльтрационного давления

Полоса, ограниченная двумя соседними линиями токов, имеет вид ленты расхода, а полоса между двумя соседними линиями равных потенциалов (равных напоров) — пояса давлений.

Первой линией тока является подземный контур сооружения, последняя линия тока проходит по водоупору. Если граница водоупора находится на неограниченно большой глубине, то гидродинамическую сетку строят до границы активной зоны фильтрации.

Для правильно построенной гидродинамической сетки (из квадратов с равными средними линиями и диагоналями) можно легко определить напор (м) в любой точке области фильтрации

$$h_x = nH/N,$$

где n — число поясов давления от конечного, выходящего в НБ, до рассматриваемого; H — напор, м; N — общее число поясов давления.

Градиент напора между двумя рассматриваемыми точками с напорами h_n и h_{n+1}

$$J = (h_n - h_{n+1})/l,$$

где l — расстояние между рассматриваемыми точками, м.

Удельный расход фильтрационного потока через одну ленту ($\text{м}^3/\text{с}$ на 1 м)

$$\Delta q = KH/N,$$

где K — коэффициент фильтрации, м/с.

Суммарный фильтрационный расход ($\text{м}^3/\text{с}$) в основании сооружения

$$q = KMH/N,$$

где M — число лент расхода.

Средняя скорость (м/с) в любом криволинейном квадрате (см. рис. 2.3)

$$v = \Delta q / \Delta S,$$

где ΔS — средняя высота квадрата, то есть длина средней линии, перпендикулярной линиям токов, м.

В результате построения сетки можно также получить линии средних скоростей фильтрационного потока в месте его выхода и расходов (см. рис. 2.3).

2.1.5. МЕТОД КОЭФФИЦИЕНТОВ СОПРОТИВЛЕНИЯ

Метод разработан Р. Р. Чугаевым. Рассматривается напорный фильтрационный поток, ограниченный сверху подземным контуром сооружения, снизу — водоупором или границей активной зоны. Потери напора фильтрационного потока учитывают как местные, так и по длине подземного контура. Метод расчета позволяет получить напоры фильтрационного потока в характерных переломных точках контура, построить эпюру фильтрационного противодавления, получить максимальные градиенты фильтрационного потока на участках и в месте выхода фильтрационного потока, вычислить расход фильтрации и оценить фильтрационную прочность грунта основания.

Весь подземный контур (рис. 2.4) делят на три основных характерных участка: входной (и выходной), горизонтальный, внутренний (вертикальный уступ со шпунтом, шпунт без усту-

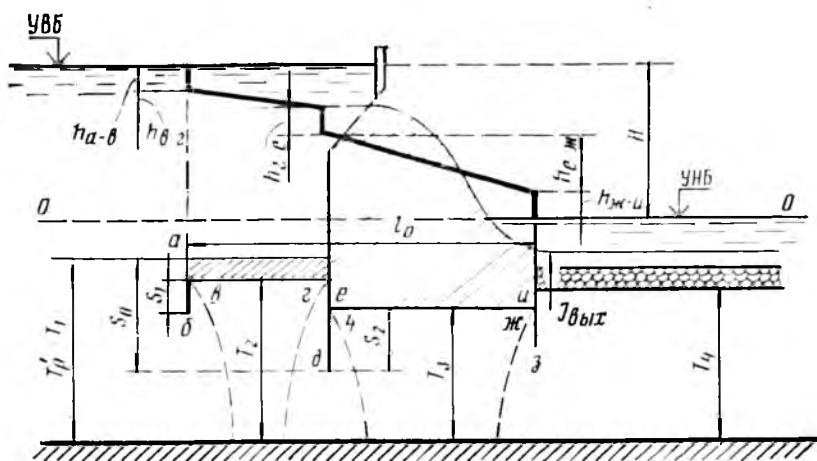


Рис. 2.4. Схема расчета флютбета по методу коэффициентов сопротивления

па или уступ без шпунта). Для каждого участка имеются формулы для определения коэффициента сопротивления ξ_i , с помощью которых можно получить потери напора фильтрационного потока на участке:

$$h_1 = \xi_1 H / \Sigma \xi_i; \quad h_2 = \xi_2 H / \Sigma \xi_i; \quad \dots \quad h_n = \xi_n H / \Sigma \xi_i,$$

где $h_1, h_2, \dots, h_n$ — потери напора на участках, соответствующих их индексам, м; $\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_n$ — коэффициенты сопротивления для этих участков; $\Sigma \xi_i$ — сумма всех коэффициентов сопротивлений.

Удельный фильтрационный расход ($\text{м}^3/\text{с}$) на 1 м вычисляют по формуле

$$q = KH / \Sigma \xi_i.$$

Численные значения коэффициентов сопротивления — функция геометрических размеров подземного контура и величины (глубины) водопроницаемого слоя основания. Отмечено, что начиная с некоторой глубины T (см. рис. 2.4) при ее дальнейшем увеличении ξ изменяются незначительно. Поэтому принято проницаемую толщу ограничивать так называемой активной зоной фильтрации T_a . В рассматриваемом методе расчета принимают две активные зоны фильтрации, то есть два расчетных положения водоупора: по напору T_a' и по выходному градиенту T_a'' . Величина активной зоны фильтрации зависит от отношения l_0/S_0 (где l_0 и S_0 — соответственно горизонтальная и вертикальная проекция подземного контура).

$\frac{l_0/S_0}{T_a'}$	5	5...3,4	3,4...1	1...0
T_a'	0,5 l_0	2,5 S_0	0,8 S_0 +0,5 l_0	S_0 +0,3 l_0

Активную зону принимают по выходному градиенту $T_a'' = (1,75 \dots 2) T_a'$. В реальных условиях положение водоупора T_d может быть на глубине выше или ниже границы активной зоны. Поэтому при расчете определяют положение расчетного водоупора (расчетную активную зону) с учетом следующих условий: если $T_a' \geq T_d$, то $T_p' = T_d$, если $T_a' < T_d$, то $T_p' = T_a'$. Это обстоятельство учитывают при определении положения водоупора по выходному градиенту, то есть применительно к T_a'' .

При вычислении фильтрационного расхода принимают $T_p''' = T_d$. Коэффициенты сопротивлений ξ вычисляют для каждой расчетной глубины. При расчетах реальных сооружений может быть несколько глубин от границы подземного контура до водоупора (T_1 ; T_2 ; T_3); для вычисления T_a' берут максимальную. Коэффициенты сопротивлений для расчетных участков подземного контура принимают по зависимостям, приведенным ниже.

Участок на входе или выходе (см. рис. 2.4)— *абвгдежзи*

$$\xi_{вх} = \xi_{вых} = \xi_{ш} + 0,44. \quad (2.1)$$

Участок контура с внутренней шпунтовой стенкой (см. рис. 2.4) и уступом — *где*

$$\xi_{ш} = (T_1 - T_2)/T_1 + (1,5S/T_2) + [(0,5S/T_2)/(1 - 0,75S/T_2)], \quad (2.2)$$

где S — глубина заложения шпунта от поверхности флюбета, м.

Горизонтальный участок подземного контура (см. рис. 2.4)— *вз*

$$\xi_r = [l - 0,5(S_1 + S_2)]/T, \quad (2.3)$$

где l — длина рассматриваемого участка, м.

Если на входе или выходе шпунт отсутствует, а имеется уступ, то $S=0$ и формула примет вид

$$\xi_{ш} = (T_1 - T_2)/T_1.$$

Эпюру фильтрационного противодействия строят на горизонтальной проекции подземного контура, иногда такое построение выполняют на развертке. Она необходима вместе с эпюрой взвешивающего противодействия для проверки флюбета на всплытие и сдвиг.

Ординаты ее на концевых участках получают несколько завышенными по сравнению с точными теоретическими решениями.

На участке выхода фильтрационного потока в НБ определяют выходные градиенты по зависимостям:

$$J = (H/T) (1/\alpha \sum \xi''),$$

где $\sum \xi''$ — сумма коэффициентов сопротивления; α — коэффициент; при $0,7 \leq T_2/T_1 \leq 1,4$;

$$\alpha = \sqrt{\sin [\pi/2 (S/T_1 + T_2/T_1 + 1)]}. \quad (2.4)$$

2.1.6. НЕКОТОРЫЕ ДРУГИЕ МЕТОДЫ РАСЧЕТОВ И ОСОБЫЕ СЛУЧАИ

Расчет по методу удлиненной контурной линии. В основу расчета положена предпосылка о линейном изменении напора по длине подземного контура. Более интенсивное падение напора на входном и выходном вертикальных участках учитывают удлинением подземного контура с обоих концов на $0,44T_p'$. Таким образом условно принимают общую удлиненную (виртуальную) величину подземного контура $L_{вир}$ (м):

$$L_{вир} = L + 2 \cdot 0,44T_p',$$

где L — фактическая длина подземного контура, м.

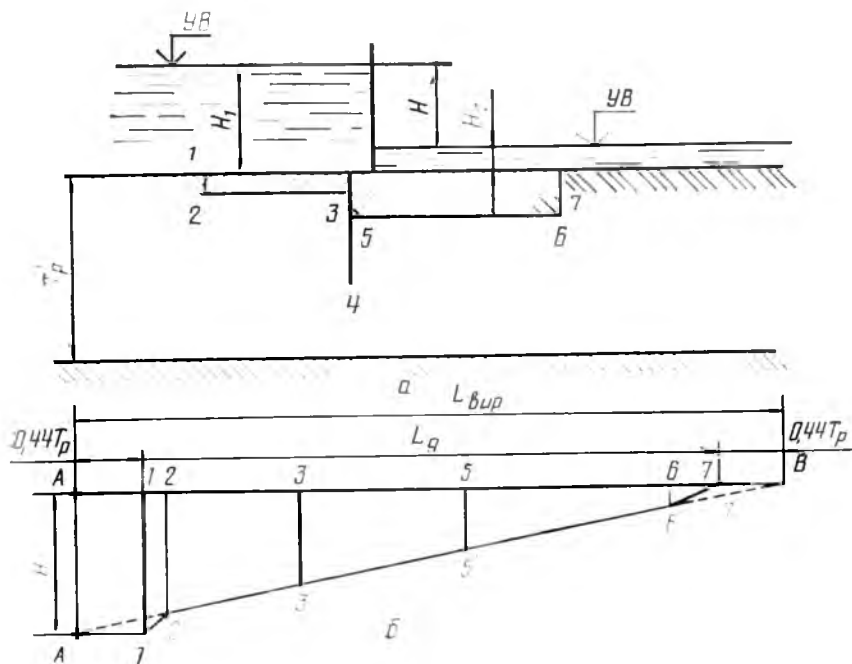


Рис. 2.5. Схема к расчету по способу удлинённой контурной линии:

а — схема флютбета; б — эпюра фильтрационного противодействия, построенная на развернутом контуре флютбета

С учетом этого строят эпюру напоров фильтрационного потока (рис. 2.5) на развернутом контуре и перестраивают на горизонтальную проекцию.

Градиент напора вдоль контура

$$I_{cr, m} = H / (L + 0,88T'_p).$$

Максимальный выходной градиент, соответствующий падению напора на отрезке 6—7,

$$I = h/l,$$

где h — потери напора на конечном вертикальном участке, взятые с эпюры, построенной при $T_p'' = T_a''$, м (ордината 6—6', см. рис. 2.5); l — длина конечного вертикального участка, м.

Приведенный метод расчета прост и удобен, применяют его для предварительного назначения размеров флютбета, которые затем уточняют на основе более строгих методов расчета.

Фильтрация в неоднородных грунтах. Для однородно-анизотропных грунтов, в которых коэффициенты фильтрации в гори-

горизонтальном и вертикальном направлениях различны, расчет ведут на основе замены такого грунта на однородно-изотропный, эквивалентный в фильтрационном отношении. В этом случае используют прием искажения пути фильтрации, изменяя горизонтальные размеры флюتبета умножением на a :

$$a = \sqrt{K_1/K_2},$$

где K_1 и K_2 — коэффициенты фильтрации грунта в горизонтальном и вертикальном направлениях для рассматриваемого грунта, м/с.

В результате этого получают эквивалентную схему флюتبета с однородно-изотропным грунтом, коэффициент фильтрации (м/с) которого

$$K = \sqrt{K_1 \cdot K_2}.$$

Для этой искаженной схемы флюتبета одним из рекомендованных методов находят параметры фильтрационного потока, а затем, используя масштаб искажения a , переносят их на реальную схему флюتبета.

Расчеты фильтрации в однородно-изотропных грунтах, состоящих из нескольких слоев с различными коэффициентами фильтрации, основаны на приведении к однородному грунту мощностью T_m с постоянным коэффициентом фильтрации K_m . Здесь также получается искаженная схема, от которой в результате расчета переходят к реальной. Приведенный коэффициент фильтрации (м/с) вычисляют по зависимости

$$K_m = (K_1 T_1 + K_2 T_2 + \dots + K_n T_n) / (T_1 + T_2 + \dots + T_n). \quad (2.5)$$

Приведенная виртуальная глубина (толща области фильтрации) (в м)

$$T_m = K_1/K_m T_1 + K_2/K_m T_2 + K_n/K_m T_n.$$

Могут быть и другие более сложные случаи геологического строения основания флюتبета, фильтрационные расчеты для которых основаны на экспериментальных исследованиях.

2.1.7. ВЛИЯНИЕ НА ФИЛЬТРАЦИЮ ОТДЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ФЛЮТБЕТА

Водонепроницаемые элементы флюتبета, как горизонтальные, так и вертикальные, служат для удлинения пути фильтрации, а следовательно, — уменьшения градиента фильтрационного потока и повышения фильтрационной устойчивости грунта основания, а также для снижения фильтрационного расхода.

Зубья, стенки устраивают обычно на входном и выходном участке подземного контура, шпунты делают в начале или в

конце понура (начале водобоя), или на водобое в конце его; может быть несколько рядов шпунтовых стенок.

Дренажи обеспечивают управление фильтрационным потоком, проходящим под флутбетом и в обход береговых стенок (устоев). Их можно делать на понуре, водосливе, водобое и под рисбермой (обязательно). За дренажем фильтрационное противодействие отсутствует.

Эффективность падения напора фильтрационного потока на отдельных участках подземного контура неодинакова. Она зависит от взаимного расположения вертикальных и горизонтальных элементов, их размеров и от числа и расположения внешних точек резких переломов подземного контура (фокусов размыва по Н. Н. Павловскому), а также от размещений дренажей. Оценивают ее сравнением градиентов напора по участкам.

Шпунтовые стенки (шпунты) металлические, деревянные (для малых напоров), железобетонные не являются полностью водонепроницаемыми; в фильтрационных расчетах это можно учесть.

2.1.8. ФИЛЬТРАЦИОННЫЕ ДЕФОРМАЦИИ ГРУНТОВ ОСНОВАНИЯ

Основные понятия. Частицы грунта под влиянием фильтрационного потока подвергаются силовому воздействию, что при некоторых условиях может привести к их перемещению, то есть к *фильтрационным деформациям грунта*. Способность грунта к сопротивлению деформациям называют *фильтрационной прочностью грунта*. Фильтрационные деформации бывают безопасные и опасные (недопустимые). Гидротехнические сооружения на грунтовых основаниях должны быть запроектированы так, чтобы не возникало недопустимых фильтрационных деформаций. По градиентам напора и показателям грунта можно судить о наличии или отсутствии в данных условиях фильтрационных деформаций. Основные виды фильтрационных деформаций: суффозия (механическая и химическая), контактный размыв, контактный выпор (отслаивание), фильтрационный выпор.

Общую фильтрационную прочность грунта основания оценивают по зависимости

$$J_{est, m} \leq J_{cr, m} / \gamma_n,$$

где $J_{est, m}$ — осредненный градиент напора в расчетной области фильтрации; $J_{cr, m}$ — осредненный расчетный критический градиент напора, зависящий от грунта основания:

Грунт осно- вания	Песок круп- ный	Песок сред- ней крупно- сти	Песок мел- кий	Суглинок	Глина
$J_{cr, m}$	0,45	0,38	0,29	0,65	1,2

γ_n — коэффициент надежности, принимаемый в соответствии с требованиями СНиП.

Для оснований сооружений I и II классов $I_{cr,m}$ определяют по результатам исследований методом ЭГДА. В остальных случаях пользуются приближенными расчетными методами (метод коэффициентов сопротивлений, метод фрагментов, метод удлиненной контурной линии и др.). Например, по методу коэффициентов сопротивлений

$$J_{cr,m} = H / (T'_p \Sigma \xi),$$

где H — расчетный напор, м; T'_p — расчетная глубина до водоупора, м; $\Sigma \xi$ — сумма коэффициентов сопротивлений, вычисленная для T'_p .

Рассмотрим кратко основные виды фильтрационных деформаций.

Суффозия. Перемещение мелких частиц через крупные поры в грунтовом массиве при воздействии фильтрационного потока — *механическая суффозия*. Она может быть внутренней (частицы перемещаются внутри массива грунта) и внешней, когда частицы выносятся фильтрационным потоком из грунтового массива. *Химическая суффозия* — это растворение и вынос фильтрационным потоком водорастворимых солей.

В несвязных грунтах при допустимом градиенте напора и коэффициенте неоднородности $\eta = K_{60,10} = d_{60}/d_{10} < 10 \dots 20$ механическая суффозия отсутствует (см. рис. 2.6).

Связные грунты (глины, суглинки) — несуффозионные. Химическая суффозия в данной книге не рассмотрена, так как это область особого исследования и рассмотрения. Для грунтов

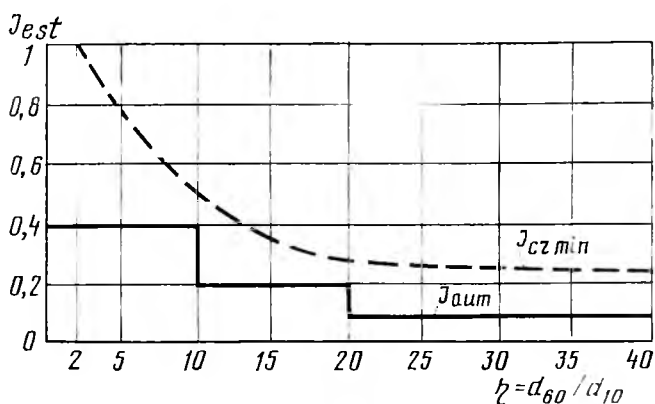


Рис. 2.6. График для определения фильтрационной прочности грунта по осредненному градиенту

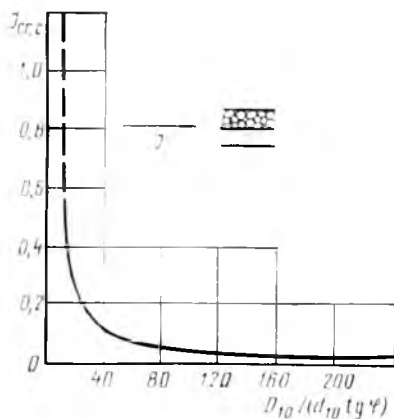


Рис. 2.7. График для определения фильтрационной прочности грунта по контактному размыву (стрелкой показано направление фильтрационного потока)

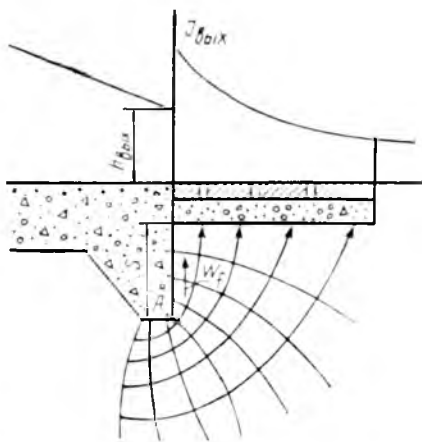


Рис. 2.8. Схема расчета выходного участка на выпор

имеются допустимые пределы содержания растворимых солей в процентах.

Контактный размыв. Он появляется под воздействием фильтрационного потока, движущегося по контакту двух соседних слоев различной крупности. Он оценивается допускаемым градиентом $I_{cr,c} = f(D_{10}/d_{10} \lg \varphi)$.

Разрушающие градиенты в зависимости от критерия $D_{10}/(d_{10} \lg \varphi)$ представлены на рисунке 2.7. Слои должны быть подобраны так, чтобы $I_{est,c}$ было бы ниже и левее кривой графика.

Контактный выпор. Здесь имеют место выпор и отслаивание частиц грунта в зоне контакта из слоя с мелкими фракциями в слой из более крупных фракций. Контактный выпор в несвязных и связных грунтах оценивают по-разному.

Для несвязных грунтов оценку возможности появления контактного выпора проводят по параметру $(D_{50}/d_{50}) (np/\lg \varphi_{sw})$ и коэффициенту неоднородности, где D_{50} и d_{50} — диаметры частиц грунтов, которые по массе в образце грунта составляют 50%. Для связных грунтов контактный выпор оценивают по коэффициенту неоднородности $K_{60,10}$ и действующему диаметру грунта D_{10} . Этим способом можно пользоваться и для несвязных грунтов при условии, что для фильтрации снизу вверх коэффициент влажности грунта $G \geq 0,95$, а минимальный диаметр пор более крупного грунта должен быть $D_{min} \leq 3$ мм.

Фильтрационный выпор. Он характеризуется тем, что имеет место отрыв и перемещение вверх (подъем) грунта восходящим фильтрационным потоком. Он появляется в месте выхода фильтрационного потока в НБ на участке примыкания к водообу (рис. 2.8).

Подъемная (фильтрационная) сила (кН) грунтового массива может быть вычислена по зависимости

$$W_f = \gamma_0 V J_{est, u},$$

где γ_0 — объемная масса воды, кг/м³; V — объем грунта, м³; $J_{est, u}$ — градиент напора фильтрационного потока.

Эта сила направлена снизу вверх и представляет силу выпора. Ей противостоит сила собственного веса грунтового массива. Критический градиент напора на выпор может быть определен из условия равновесия призмы грунта единичной площади в основании под действием приведенных сил:

$$J_{cr, u} = \rho / \rho_a - (1 - n),$$

где ρ и ρ_a — плотность грунта и воды, кг/м³; n — пористость грунта.

Действительный средний градиент в месте выхода фильтрационного потока можно найти из формулы

$$J_{est, u} = h_{вых} / l,$$

где $h_{вых}$ — падение напора на выходном вертикальном участке, м; l — длина пути фильтрации, м.

Сравнение имеющегося градиента выпора с допускаемым дает ответ о возможности появления выпора и необходимости устройства пригрузки.

Толщину пригрузки (м) вычисляют по формуле

$$t = S (J_{est, u} - J_{cr, n}) (\gamma_0 / \gamma_s) \gamma_n,$$

где S — длина выходного участка фильтрации (зуба) (см. рис. 2.8), м; γ_s — объемный вес пригрузки, кг/м³; γ_n — коэффициент запаса.

2.2. ФИЛЬТРАЦИЯ В ОБХОД ГИДРОТЕХНИЧЕСКИХ СООРУЖЕНИЙ

Обычно бетонное водоподпорное сооружение (плотина, регулятор, шлюз и др.) сопрягают боковыми элементами — устоями с грунтовой плотиной или берегом. При этом по контакту в зоне примыкания возникает фильтрация в обход сооружения, носящая пространственный характер, которая сочетается с напорной фильтрацией под сооружением. Фильтрационный поток,двигающийся в обход боковых устоев, безнапорный, то есть со свободной поверхностью. Устройство сопрягающих устоев с

Фильтрационные расчеты. Для сооружений I и II классов используют метод ЭГДА, позволяющий определить параметры фильтрационного потока в условиях пространственной задачи, а III и IV класса — упрощенный метод расчета обходной фильтрации. Принимают плоскую схему движения фильтрационного потока по контакту грунта засыпки и тыловой поверхности (обходному контуру) устоя берегового или сопрягающего. Фильтрационный расчет сводится к построению кривой депрессии вдоль поверхности устоя за ним. Здесь условно принимают схему фильтрации как бы через однородную плотину (с дренажем или без него) вдоль разорванного контура устоя. Схема такой фильтрации дана на рисунке 2.9. Кривую депрессии строят на основе формулы Дюпюи

где h_x и x — соответственно ордината и абсцисса кривой депрессии, м; h_1, h_2 — расстояние от плоскости сравнения до соответствующих точек депрессионной



31

кривой, м (см. рис. 2.9); $L_{\text{пр}}$ — общая длина кривой депрессии (участка фильтрации), м;

$$L_{\text{пр}} = 0,4h_1 + L + 0,4h_2,$$

где $0,4h_1$ и $0,4h_2$ — участки удлинения депрессионной кривой, косвенно учитывающие потери фильтрационного потока на вход и выход, м; L — расстояние между точками начала и конца депрессионной кривой по горизонтали (иногда принимают по развертке устоя), м.

Условно удельный расход ($\text{м}^3/\text{с}$) фильтрационного потока в зоне его выхода (для приведенной схемы)

$$q = K(h_1^2 - h_2^2)/2L_{\text{пр}},$$

где K — коэффициент фильтрации грунта засыпки, м/с.

2.3. ФИЛЬТРАЦИЯ В СКАЛЬНЫХ ОСНОВАНИЯХ

2.3.1. ОСОБЕННОСТИ ФИЛЬТРАЦИИ В СКАЛЬНЫХ ПОРОДАХ

Скальные породы представляют собою плотную массу с очень малой пористостью (0,5...0,8%), поэтому их считают практически водонепроницаемыми. Однако в них имеются трещины, системы трещин (с размерами от очень небольших — доли миллиметров до нескольких метров). Крупные трещины часто заполнены обломочным материалом, фильтрация может быть и по ним, и по мелким трещинам. Коэффициент фильтрации зависит от размеров трещин. При наличии в скале только мелких трещин при расчете фильтрации можно допускать условно, что она подчиняется закону Дарси. При крупных трещинах движение потока в них носит турбулентный характер. В скальных породах может быть механическая или химическая суффозия.

Для определения уровней, давлений, градиентов, расходов при проектировании сооружений I, II, III классов используют метод ЭГДА, в нормативных документах предлагают и другие методы. Для сооружений IV класса и для предварительных расчетов сооружений I...III классов расчет ведут методом коэффициентов сопротивлений и другими приближенными методами.

В отличие от нескальных оснований здесь объемные фильтрационные силы и полное противодействие по контакту с основанием в расчетах необходимо принимать с коэффициентом $\alpha_2 \leq 1$ ($\alpha_2 = 0,7 \dots 0,95$ — коэффициент эффективной площади противодействия), а давление воды на основание в ВБ и НБ и напорную грань плотины — с множителем $(1 - \alpha_2)$. Для скальных грунтов иногда допускается принимать $\alpha_2 = 0,5$ (для глинистых так же).

2.3.2. ФИЛЬТРАЦИОННОЕ ПРОТИВОДАВЛЕНИЕ И ПРОТИВОФИЛЬТРАЦИОННЫЕ МЕРОПРИЯТИЯ В ОСНОВАНИЯХ ПЛОТИН

Эпюры фильтрационного W_f и взвешивающего W_g противо- давлений по контакту плотины и основания при наличии про- тивофильтрационных завес и дренажных устройств приведены на рисунке 2.10. Характерными ординатами эпюр фильтрацион- ного противодействия являются H — расчетный напор; h_3 — остаточный напор по оси противофильтрационной завесы; h_{dr} — остаточный напор по оси дренажа (зависит от сочетания нагрузок).

Эпюру взвешивающего противодействия строят, как и для сооружений, на нескальных основаниях. Силы противодействия (на 1 м длины сооружения перпендикулярно плоскости черте- жа) определяют как площадь эпюры, умноженную на удельный вес воды 1 т/м³.

Суммарное противодействие

$$W = (W_f + W_g) \alpha_2 \gamma_0 \cdot l, \quad (2.6)$$

где α_2 — коэффициент эффективной площади основания.

Противофильтрационные мероприятия в основании плотин. К ним относятся противофильтрационные завесы, иногда бетон- ные стенки, дренаж основания, цементации, битумизация осно- вания. В буровые скважины, расположенные в один, два или

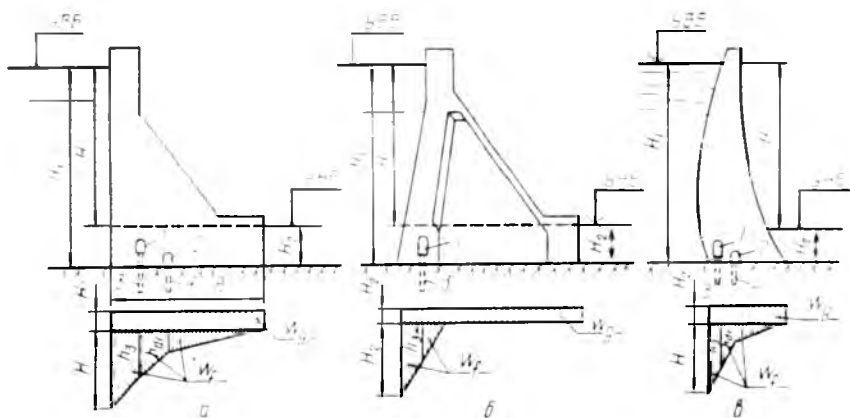


Рис. 2.10. Эпюры противодействий на подошву плотины со скальным основа- нием при наличии противофильтрационной завесы и дренажных устройств:

а, б, в — плотины соответственно гравитационная, массивно-контрфорсная и арочная; 1, 2 — цементационная и дренажная галереи; 3 — цементационная завеса; 4 — вертикальный дренаж

три ряда, закачивают цементный раствор, получая противofiltrационную завесу. Глубина завесы — до кровли водонепроницаемых пород (где удельное водопоглощение — 0,01... 0,05 л/мин), практически глубина завесы $h_{as} = (0,5...1)H_{пл}$. Толщину (м) ее принимают из условия обеспечения на ней допускаемых градиентов

$$I_{max} < I_{adm}; \quad I_{max} = H \Delta / l,$$

где H — действующий напор, м; l — толщина завесы, м; Δ — коэффициент, при $b/h_{as} < 1$ $\Delta = 0,75...0,85$; при $b/h_{as} = 1...2$ $\Delta = 0,7...0,75$; при $b/h_{as} = 2$ $\Delta = 0,65...0,7$; при отсутствии дренажа основания Δ уменьшают на 20...25%.

Число рядов принимают для обеспечения необходимой величины l , а расстояние между рядами от 1,4...2 до 3...4 м (зависит от трещиноватости скалы), диаметр скважин $d = 45...100$ мм. Завеса может быть как вертикальной, так и наклонной.

Глубокие цементационные завесы, доходящие до нерастворимых пород, применяют в основаниях, содержащих растворимые выщелачиваемые соли (гипсы, ангидрид, каменную соль и др.), с целью предотвращения деформаций от химической суффозии.

В слабых и полускальных породах устраивают противofiltrационные стенки: траншею шириной 0,3...1 м заполняют бетоном или глинобетоном.

Дренажи. Для снятия части фfiltrационного противодействия в теле плотины (см. рис. 2.10) или в конце понура устраивают дренаж для перехвата фfiltrационного потока. Особенно эффективен он в сочетании с завесами.

Укрепительная (площадная) цементация. Она обеспечивает монолитность основания. Глубина цементации составляет 5...15 м и зависит от трещиноватости основания и его мощности. В скважины нагнетают густые растворы с низким водоцементным отношением.

Различают:

связующую цементацию — для обеспечения контакта плотины с основанием;

битумизацию — нагнетание битумных эмульсий (взвешенных частиц битума в воде) или перегретого электрооток жидкого асфальта при наличии в основании агрессивных вод;

глинизацию — нагнетание смеси глины, песка и воды. Эффективна при наличии в основании карста, каверн и трещин больших размеров. В сильно нарушенных и закарстованных породах применяют густые глиноцементные растворы состава 1:2 или 1:3 (цемент:глина). Здесь наряду с обеспечением водонепроницаемости экономия цемента (по сравнению с цементацией) достигает 30...50%.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ

1. Почему возникает фильтрация под гидротехническими сооружениями?
2. Какие воздействия оказывает фильтрационный поток на подземный контур сооружения и на грунт основания?
3. Назовите основные элементы подземного контура сооружения (флютбета) и укажите их назначение.
4. Какие задачи решают с помощью фильтрационных расчетов?
5. В чем сущность фильтрационного расчета по методу удлиненной контурной линии?
6. Как проводят фильтрационный расчет методом коэффициентов сопротивлений?
7. Как рассчитывают фильтрацию под флютбетом методом гидродинамической сетки? Что такое метод ЭГДА?
8. Виды фильтрационных деформаций и расчет общей и местной фильтрационной прочности нескальных грунтов.
9. Особенности фильтрации в основаниях сооружений, сложенных скальными грунтами, и способы улучшения скальных грунтов.

Глава 3. КАНАЛЫ И СООРУЖЕНИЯ НА НИХ

3.1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О КАНАЛАХ

Канал — открытое искусственное русло, предназначенное для транспортировки воды в народнохозяйственных целях. По хозяйственному назначению каналы бывают *оросительные* (магистральные, внутрисистемные), *осушительные* (коллекторы, водоприемники), *водопроводные* (для водоснабжения), *судоходные*, *обводнительные*, *энергетические*, *лесосплавные*, *рыбоводные* и др.

По способу подачи воды в них каналы разделяют на *самотечные* и *машинные* (в последние воду из источника перекачивают насосными станциями).

Большинство построенных крупных каналов имеют комплексное назначение, то есть служат одновременно, например, для орошения, обводнения, водоснабжения и судоходства (Каракумский канал). Иногда на участках резкого падения местности на трассе канала целесообразно строить гидроэлектростанцию.

По условиям использования каналы делят на *постоянные* (основные) и *временные* (второстепенные).

По капитальности, как и все гидросооружения, каналы разделяют на четыре класса.

По геологическим условиям трассы каналы бывают *проходящие в скальных* и *нескальных* грунтах. От этого зависят форма и размеры поперечного сечения и тип крепления.

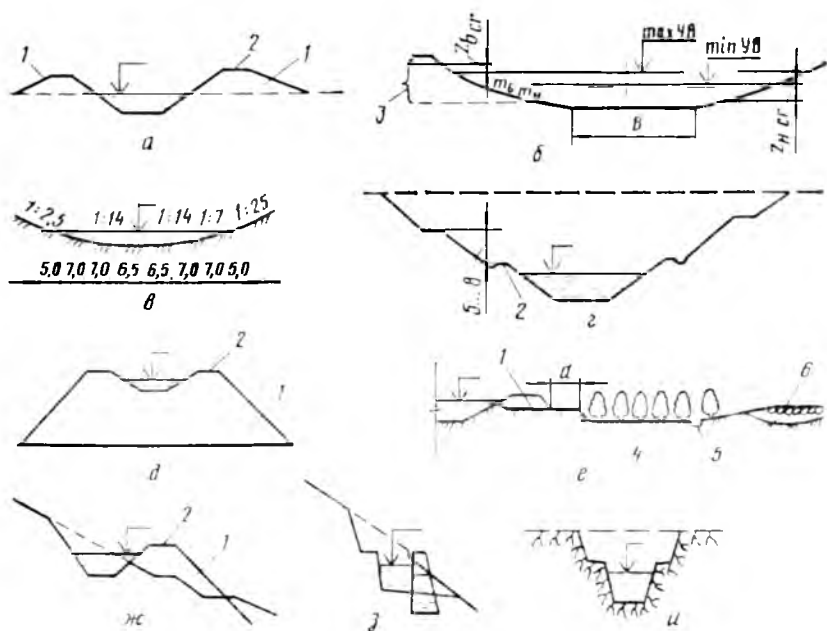


Рис. 3.1. Поперечные сечения каналов:

а — трапециевидное и в полунасыпи-полувыемке; *б* — полигональное; *в* — параболическое; *г* — канал в глубокой выемке; *д* — в насыпи; *е* — канал с дорогой и резервом; *ж*, *з* — каналы на косогоре; *и* — в скальном грунте; *1* — насыпь; *2* — берега; *3* — зона крепления откоса; *4* — резерв с посадкой кустарников или деревьев; *5* — водоотводная канава; *б* — дорога (инспекторская); $z_{в cr}$ и $z_{н cr}$ — запасы крепления выше максимального и ниже минимального уровней воды (размеры в м)

По форме поперечного сечения каналы бывают *трапециевидные, параболические, полигональные, прямоугольные, полукруглые, ложбинообразные* (рис. 3.1).

По характеру уклона различают каналы с *прямым, нулевым и обратным* уклоном.

По технологическим условиям работы различают каналы с *непрерывным процессом работы и прерывистым*.

По состоянию потока каналы могут быть со *спокойным, бурным* и даже *сверхбурным* режимом.

Параметры канала (поперечное сечение, уклон, глубины, скорость течения и другие) зависят от его пропускной способности и назначения. Каналы мелиоративные (оросительные и осушительные) — внутрисистемные — изучают в курсе «Сельскохозяйственные гидротехнические мелиорации».

Трассу канала выбирают в зависимости от его назначения. При трассировке водопроводных каналов учитывают необходимость создания санитарной зоны по обе стороны от него, поэто-

му трассу канала проектируют вдали от населенных пунктов. Оросительный канал прокладывают по более высоким отметкам местности, осушительный — по более низким. Энергетические каналы прокладывают, исходя из обеспечения минимума суммы стоимости потерянной энергии в канале и эксплуатационных расходов.

Поперечное сечение канала зависит от его назначения, способа строительства, топографических и инженерно-геологических условий трассы, пропускной способности, режима работы, наличия облицовки и других факторов. Наиболее распространена для каналов различного назначения трапециевидная форма поперечного сечения (удобна по условиям производства работ); полигональную форму живого сечения придают судоходным каналам для снижения сопротивлений движению судна; каналы, проходящие в скальных грунтах, имеют прямоугольное поперечное сечение, крупные осушительные — параболическую и т. д.

Верхним пределом скорости потока для необлицованных каналов является неразмывающая скорость, которая зависит от характера грунтов, слагающих русло (связные или несвязные), размеров частиц (среднего диаметра) для несвязных грунтов. Допускаемые *неразмывающие* скорости для неукрепленных и укрепленных каналов можно взять из справочной литературы. Нижний предел допускаемых скоростей в каналах — *незаиляющие* скорости, допустимые значения которых также берут из справочной литературы. Существуют и нижние пределы скорости, при которых каналы могут зарастать. Глубокие каналы зарастают водной растительностью на прибрежных участках (глубиной 1,5...2 м), а каналы, имеющие глубину потока менее 1,5...2 м, могут зарастать по всему сечению. Чтобы этого не происходило, скорость потока должна быть не менее 0,5...0,6 м/с.

В каналах, работающих в зимнее время, регулируя скоростной режим, обеспечивают создание ледяного покрова толщиной 0,1...0,15 м, под которым впоследствии можно допускать увеличение средних скоростей до 1,2...1,5 м/с.

3.2. ОБЛИЦОВКА И ОДЕЖДА КАНАЛОВ

Каналы, выполненные в грунтах без облицовки или одежды, обычно имеют большие потери воды на фильтрацию. Для защиты их от размыва течением, от волновых и механических воздействий, а также для снижения или полного устранения фильтрационных потерь и уменьшения площади поперечного сечения используют различные облицовки и одежды. Их тип принимают на основе технико-экономического сравнения вари-

антов. Для одежд и облицовок используют следующие материалы.

Крепление каменными материалами. Этот материал широко применяют в районах, богатых камнем. Различают следующие виды креплений из камня.

Отсыпка из гравия или щебня. Для защиты откосов каналов с заложением $m=2\ldots 4$ от размыва течением, от действия небольших волн, от зарастания делают покрытие толщиной 15...25 см из гравия крупностью 20...40 мм или щебня крупностью 40...70 мм. Если откос сложен суффозионными грунтами, то крепление кладут на слой подготовки из песка или карьерной мелочи толщиной 10...15 см.

Каменная наброска. Используют на крупных или суходонных каналах для защиты от размыва течением и от действия волн. Определяют массу камней на откосах $m=2,5\ldots 5$ и диаметр, приведенный к шару. Толщина наброски должна быть не менее трех диаметров камня. Камень используют несортированный с содержанием расчетного диаметра не менее 50% с укладкой на соответствующую подготовку.

Каменные крепления в виде наброски распространены широко благодаря малой трудоемкости, допустимости значительных деформаций откоса, простоте восстановления и ремонта. Однако это крепление сильно проницаемое, его необходимо защищать от суффозии и оплывания грунта откоса, крепление к тому же имеет большую шероховатость.

Каменная наброска в плетневых клетках. Если имеются на месте неломкие, не гниющие в воде кустарники, то такое крепление эффективно. Заплетенные кустарником клетки с размером стороны 0,5...0,7 м заполнены каменной наброской слоем 25...40 см по подготовке из гравия, щебня или мха. Это крепление требует больших затрат ручного труда.

Каменная наброска в железобетонных ящиках. Квадратные ящики без дна со стороной 1,2...1,5 м и глубиной 0,4 м заполняют камнем, непригодным по крупности для обычной наброски по слою подготовки из щебня или гравия.

Крепление каналов из бетона или железобетона. Их применение позволяет: уменьшить потери воды на фильтрацию; обеспечить защиту дна и откосов от размывов; уменьшить площадь поперечного сечения за счет более низкого коэффициента шероховатости и в ряде случаев увеличения скорости.

Применение таких покрытий должно быть обосновано технико-экономическими расчетами, так как эти крепления дорогие. Покрытие укладывают на прочное и устойчивое основание, на спланированный откос (или на дренирующую подготовку с дренами для отвода воды). Заложение откоса зависит от гео-

технических свойств грунта. Если покрытие служит также для защиты от фильтрации из канала, то особое внимание обращают на качество герметизации стыков между плитами. Толщину плит устанавливают расчетом; в первом приближении можно назначать 12...15 см, иногда под покрытие укладывают пленку на выравнивающем песчаном слое. В особых случаях покрытие может быть двухслойным.

Могут быть также использованы грунтоцементные облицовки, торкрет-бетон, оглеение, битумизация, бетонитовые растворы, искусственный кольматаж, механическое уплотнение, грунтовые экраны и др.

Асфальтобетонные покрытия. Этот облегченный тип крепления применяют на каналах с заложением откоса $m \geq 2$. В качестве покрытия используют плотный гидротехнический холодный или горячий асфальтобетон с песчаным или другим мелкозернистым заполнителем толщиной 5...8 см. Откос перед укладкой покрытия обрабатывают гербицидами для защиты от прорастания.

Экраны из полимерных пленок. Их выполняют на мягких грунтах с предварительной обработкой поверхности гербицидами. Пленку укладывают на выровненный откос ($m \geq 3$) по подготовке из песчаного грунта, швы пленки или склеивают, или сваривают. По пленке укладывают слой уплотненного грунта толщиной не менее 0,5 м.

Экраны из глинистых грунтов. Это противофильтрационные устройства. По поверхности сильнопроницаемого грунта укладывают экран из хорошо уплотняемого грунта (глины, суглинка) слоем 0,4...0,6 м по дну и 0,6...1 м — на откосах. Сверху экран прикрывают слоем щебня толщиной 0,1...0,15 м на дне канала и слоем одежды по подготовке — на откосе.

Шпунтовые стенки. Их применяют на судоходных каналах в тех случаях, когда грунт допускает забивку шпунта. Шпунт делают из железобетона ребристым или таврового сечения.

3.3. СООРУЖЕНИЯ НА КАНАЛАХ

На каналах возводят *общие* (регулирующие, водопроводящие, сопрягающие), применяемые почти на всех каналах, независимо от их назначения, и *специальные*, используемые для определенных водохозяйственных целей, сооружения.

Регулирующие сооружения (подпорные регуляторы, перегородивающие сооружения, водовыпуски в каналы низшего порядка, аварийные сбросы, промывные регуляторы и др.) служат для управления потоком на каналах мелиоративного назначения.

Водопроводящие сооружения (акведуки, лотки, дюкеры, трубы под каналами, туннели) устраивают при пересечении трассы канала с дорогами, водотоками, оврагами и другими препятствиями.

Сопрягающие сооружения (быстротоки, перепады многоступенчатые и консольные) служат для преодоления участка трассы канала с сосредоточенным падением.

Специальными сооружениями на каналах могут быть *судоходные шлюзы, насосные станции, лесосплавные лотки, сороудерживающие и рыбозащитные устройства.*

3.3.1. РЕГУЛИРУЮЩИЕ СООРУЖЕНИЯ

По назначению регулирующие сооружения можно разделить на:

водовыпуски, подающие воду в каналы младшего порядка; *подпорные* или *перегораживающие регуляторы*, размещаемые поперек канала с целью обеспечения необходимого уровня воды в канале (или обеспечения нормального функционирования водовыпуска);

сбросные (устьевые) регуляторы, служащие для сброса воды из каналов осушительных систем в коллекторную сеть;

переезды, совмещенные с регуляторами.

Имеются регуляторы, совмещенные с быстротоком (или с одноступенчатым перепадом) и переездом, или без переезда.

Пропускная способность таких сооружений от нескольких сот литров до десятков кубических метров в секунду.

На мелиоративных системах используют большое число регулирующих сооружений, поэтому нашли широкое применение типовые решения из унифицированных железобетонных деталей.

Регулирующие сооружения должны обеспечивать нормальное регулирование расходов и уровней с возможно полным внедрением автоматизации; быть простыми в эксплуатации и экономичными — минимум затрат средств и времени на строительство с обеспечением надежности и долговечности. При их строительстве используют типовые решения, применяют новые строительные материалы и прогрессивные методы.

По конструкции регуляторы делят на открытые, диафрагмовые и трубчатые.

Открытые регуляторы используют как водозаборные сооружения в плотинных и бесплотинных водозаборах, подпорные сооружения, вододелители, водовыпуски в каналы младшего порядка. Эти сооружения применяют при невысоких колебаниях уровня перед регулятором и небольших перепадах при пропуске максимальных расходов. Они удобны в эксплуатации на

каналах, работающих круглый год с шуговыми, ледовыми и наледными явлениями.

Открытый регулятор — искусственное русло, ограниченное снизу флутбетом, с боков — продольными стенами, и имеющее быки, разделяющие отверстие на пролеты (или без быков), оснащенные затворами с подъемным механизмом для управления водным потоком (рис. 3.2), расположенными на служебном мосте. Высотное положение регулятора в канале зависит от его назначения. Например, подпорный регулятор размещают поперек канала, и он должен обеспечивать в необходимых случаях полное опорожнение канала и не создавать дополнительных больших подпоров при пропуске форсированного расхода; регулятор-водовыпуск располагают на одном из берегов (откосов) магистрального (или другого) канала, и он должен обеспечивать подачу расчетного расхода в младший канал, в том числе и при минимальном уровне в старшем канале, и т. п.

Гидравлический расчет открытого регулятора проводят для решения следующих задач: проверки пропускной способности принятого сооружения или определения размеров регулятора по заданному расходу и перепаду уровней; обеспечения гашения энергии потока, выходящего из отверстия регулятора, в пределах сооружения; проверки фильтрационной устойчивости грунтов под флутбетом сооружения. Соответствующие формулы для расчета, коэффициенты, используемые в них, имеются в справочной и специальной литературе. Существует также много атласов типовых сооружений, изданных проектными организациями. При их использовании задача сводится к подбору по расходу соответствующего сооружения и привязке его к реальным условиям.

Диафрагмовые регуляторы — разновидность открытого. Их можно использовать так же, как водозаборные сооружения, с тем отличием от открытых регуляторов, что в водосточнике допускаются значительные колебания уровней. Регулятор снабжен специальной диафрагмой (забральной стенкой), которая позволяет существенно уменьшить высоту затвора (рис. 3.3). Отметку низа диафрагмы принимают по расчету на пропускную способность регулятора при наименьшем уровне перед ним.

Компоновка узлов регулирующих сооружений. Несколько регуляторов, расположенных рядом друг с другом, подающих воду из одного канала в ряд каналов младшего порядка, называют узлом регулирующих сооружений. Как правило, это один подпорный регулятор, обслуживающий несколько водовыпусков.

Узлы регулирующих сооружений могут иметь *сближенную* или *удаленную* компоновку. При сближенной компоновке

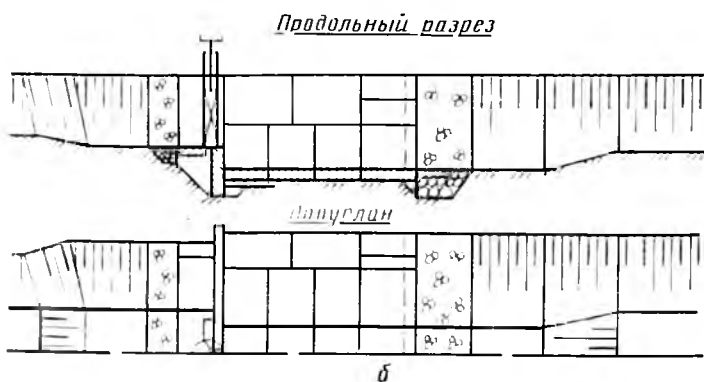
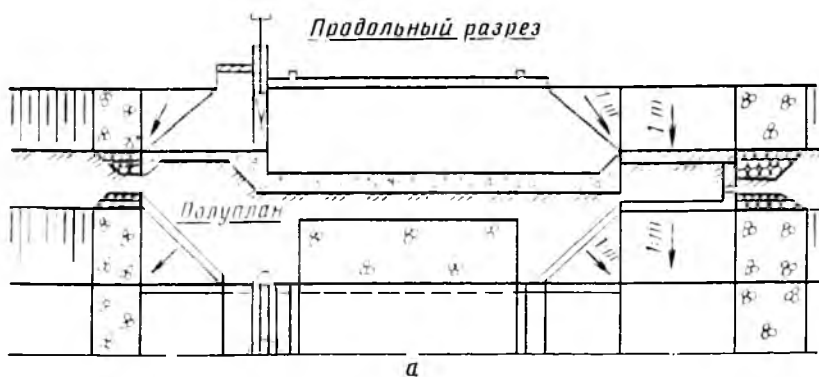


Рис. 3.2. Основные типы открытых регуляторов на каналах мелиоративных систем:

а — монолитный; *б* — сборный

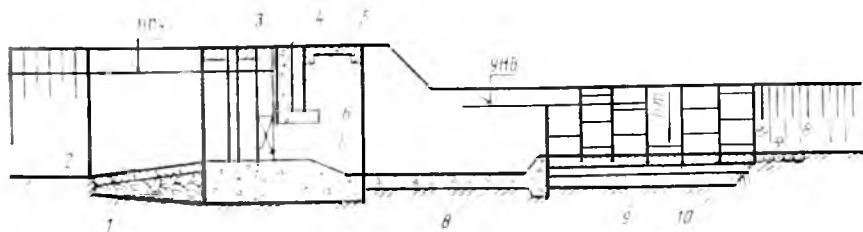
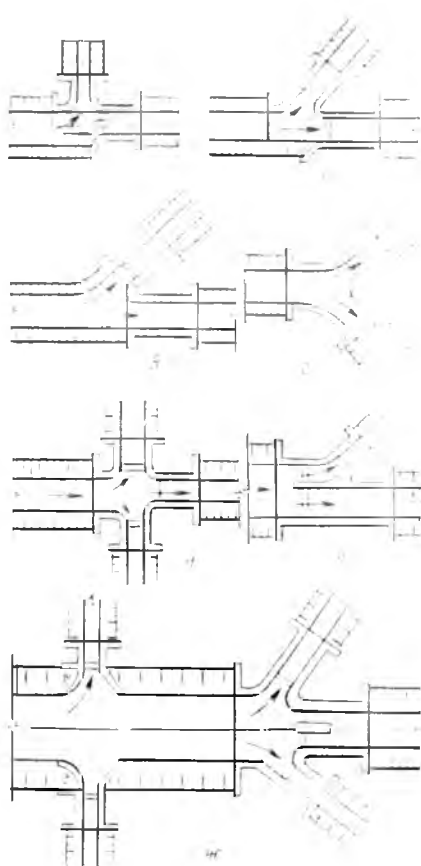


Рис. 3.3. Диафрагмовый регулятор:

1, 2 — понур; 3 — паз для шандор; 4 — диафрагма; 5 — паз для складирования шандор; 6 — затвор; 7 — водослив; 8 — водобой; 9 — рисберма; 10 — обратный фильтр

Рис. 3.4. Схемы компоновки узлов регуляторов:

а, б, в, г, д, е — сближенная схема; ж — сближенная в сочетании с удаленной



(рис. 3.4) сооружения располагают на минимально допустимом расстоянии друг от друга при общем понуре.

Преимущество сближенной компоновки: некоторая экономия материалов за счет общего понура, сокращения объема соединительных стенок. Недостаток: уменьшение точности водомерности сооружений узла из-за близкого расположения точек водозабора.

Удаленная компоновка повышает стоимость узла, ведет к отложению наносов в расширенной части канала, образовавшейся при таком размещении сооружений. Однако при этом увеличивается точность водомерности сооружений узла, так как изменение расхода одного из сооружений практически не сказывается на пропускной способности остальных. Удаленная компоновка предпочтительнее особенно тогда, когда предусматривают мероприятия по удалению наносов с участка их отложения (например, применяют сбросной или промывной регулятор).

Трубчатые регуляторы (рис. 3.5) применяют широко как на оросительных, так и на осушительных системах в качестве переездов, совмещенных с регуляторами и сопрягающими сооружениями (или без сопрягающих), в качестве самостоятельных переездов, водовыпусков. Для каналов, проложенных в грубой выемке, их использование выгодно, здесь нет необходимости возведения пролетных строений для мостов-переездов. Трубчатые регуляторы достаточно просто компонуются в узлах из нескольких гидротехнических сооружений.

В трубчатых регуляторах широко применяют сборные элементы — сборные трубы круглого поперечного (см. рис. 3.5)

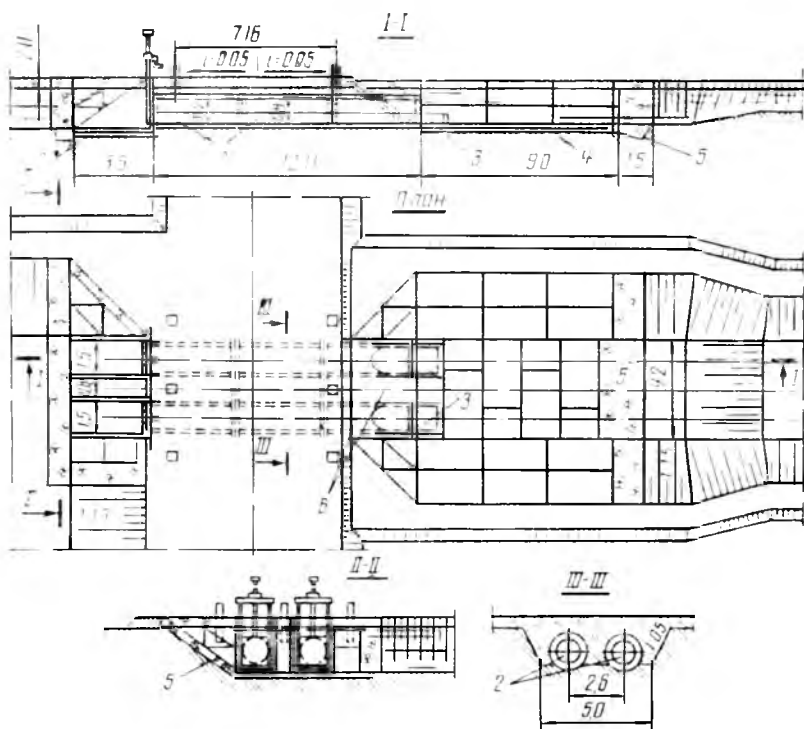


Рис. 3.5. Двухочковый трубчатый регулятор с переездом:

1 — подготовка из бетона; 2 — трубы; 3 — гаситель; 4 — гравийная подготовка; 5 — каменная наброска; 6 — монолитный бетон (размеры в м)

и (реже) прямоугольного сечения. Прямоугольное поперечное сечение труб используют при пропуске высоких расходов (десятки кубических метров в секунду).

Сооружения могут быть в зависимости от расхода одноочковые и многоочковые; по гидравлическому режиму — напорные, безнапорные и полунанпорные; со стороны НБ — затопленные и незатопленные.

Трубы укладывают непосредственно на грунт или на подготовку из бетона, или на фундаментную подушку (с охватом круглой трубы на $90 \dots 120^\circ$). В многоочковых сооружениях расстояние между трубами должно обеспечивать возможность уплотнения грунта. Трубы по поверхности, обращенной к грунту, покрывают раствором битума в керосине, горячим битумом или другим видом гидроизоляции. На лотках и каналах, запроектированных с уклоном более критического, устанавливают

трубчатые водовыпуски, забирающие воду со дна лотка (канала) через отверстие, перекрытое решеткой.

В результате проведения единой классификации многочисленных сооружений мелиоративных систем появилась возможность собирать сооружения различного назначения из одних и тех же унифицированных элементов. Унификация деталей позволяет обеспечить централизованное изготовление при высокой механизации производства. Конструкция типового трубчатого регулятора представлена на рисунке 3.5.

Особые случаи строительства регулирующих сооружений.

В практике гидромелиоративного строительства могут встречаться условия, не типичные для большинства районов аридной зоны. Например, возведение сооружений на каналах в условиях лессовых грунтов, в районах вечной мерзлоты и др.

Особенности возведения регулирующих сооружений на пучинистых грунтах и в районах вечной мерзлоты. Способность грунтов с естественной влажностью (равной или большей влажности на границе раскатывания) увеличиваться в объеме при промерзании называют морозным пучением. Явление пучения грунта основания приводит к большим деформациям сооружения в целом и его отдельных элементов.

Возведение сооружений (регуляторов, водовыпусков и др.) на участках каналов, сложенных пучинистыми грунтами, осуществляют при выполнении следующих мероприятий:

- замена пучинистого грунта непучинистым не менее чем на $\frac{2}{3}$ глубины сезонного промерзания, так как силы морозного пучения более активно проявляются в верхней части зоны промерзания;

- опирание сооружений на сваи, которые воспринимают касательные силы морозного пучения;

- разработка гибких конструкций, способных к восприятию деформаций морозного пучения;

- применение теплоизоляции (защищающей от промерзания).

В районах распространения вечномерзлых грунтов гидротехнические сооружения на каналах возводят, соблюдая один из двух принципов: сохранение основания в мерзлом состоянии и допущение постепенного или предварительного оттаивания.

Технико-экономическое сравнение вариантов позволяет выбрать температурный режим основания. При этом необходимо учитывать: температуру вечномерзлого грунта, его зерновой состав, льдистость, режим работы сооружения и способ производства работ. Сооружения выполняют из древесины (обычно это районы, богатые лесом) или железобетона. Деревянные регуляторы принимают ряжевого и свайно-обшивного типа. Ряжевые конструкции достаточно долговечны и способны пе-

реносить значительные деформации. Для железобетонных сооружений используют монолитный железобетон и сборно-монолитные конструкции на сваях. В пазухах сооружений, то есть со стороны обратных засыпок и основания, кроме свай, предусматривают теплоизоляцию.

Сооружения на лёссовидных, просадочных грунтах. В связи с тем, что в процессе эксплуатации сооружений на лёссовых грунтах возникают деформации (если при проектировании сооружений не предусмотрены соответствующие меры), рекомендуются следующие мероприятия для улучшения работы сооружений:

- предварительное замачивание грунта основания сооружения;

- механическое глубинное или поверхностное уплотнение основания;

- замена просадочного грунта непросадочным, устройство подушки;

- химическое, электрохимическое и термическое закрепление грунта;

- глинизация и обработка грунта синтетическими смолами; возведение сооружения без предварительного улучшения строительных свойств грунта с последующей перестройкой его после деформаций.

В качестве временных сооружений (на время консолидации просадочности лесса) используют сооружения из мягких облочеч, рассмотренные в главе 4. Предварительное замачивание грунта основания не обеспечивает полного прекращения просадки, во время эксплуатации практически всегда наблюдаются послепросадочные деформации. Предварительное замачивание дает большой эффект, если его применять с дополнительной пригрузкой, послепросадочные деформации сооружения и основания при этом уменьшаются.

3.3.2. ВОДОПРОВОДЯЩИЕ СООРУЖЕНИЯ

Акведуки (иногда их называют мостами-водоводами). Их устраивают при пересечении канала с препятствием (водоток, дорогой, суходолом), которое располагают на более низких или более высоких отметках по сравнению с каналом. При этом возможно несколько случаев: канал посредством акведука проходит над препятствием (дорогой, оврагом, другим каналом) или канал трассируют под акведуком, а по акведуку пропускают ручей или селевой поток. Во втором случае это будет уже селепровод.

Акведук — лоток, установленный на балочной, рамной или арочной мостовой конструкции (рис. 3.6). Акведуки бывают

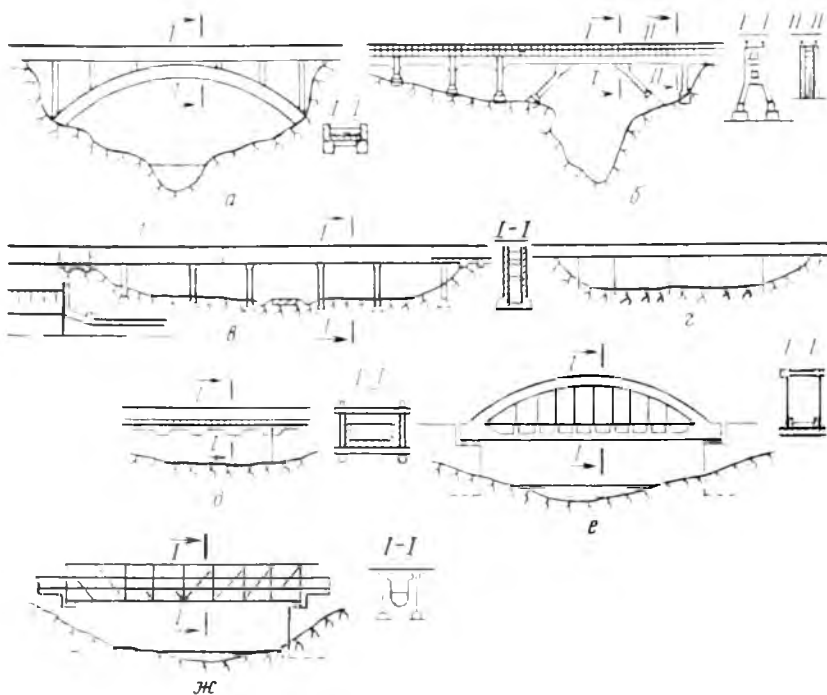


Рис. 3.6. Акведуки:

a — на арочном пролетном строении *б* — рамный в узком глубоком ущелье; *в*, *г*, *д* — с поймой в широких и неглубоких долинах; *е* — в виде подвесной конструкции; *ж* — деревянный; *1-1* — шов

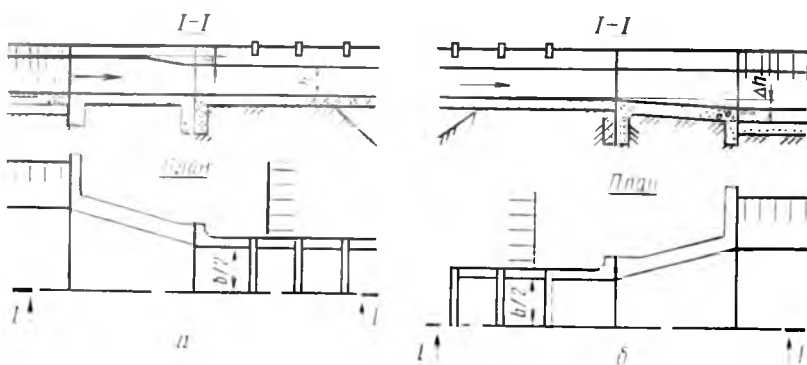


Рис. 3.7. Входная (*a*) и выходная (*б*) части акведука:

h — глубина в лотке; *z* — напор на входе; Δh — снижение отметки дна на выходе, Δh ; *z*, *b* — ширина лотка

чаще всего железобетонными (монолитными или сборными), реже деревянными, металлическими и комбинированными. Если акведук проходит над узким каньоном (ущельем) из скальных пород, то лоток располагают на пролетном строении арочного типа (см. рис. 3.6). При пересечении каналом широких долей, пойм, рек, дорог применяют акведук рамной конструкции, в которой лоток является верхним ригелем рамы, а опорами служат стойки. Для обеспечения водонепроницаемости стыки соседних рам выполняют в виде температурно-осадочных водонепроницаемых гибких швов, которые должны выдерживать линейные и угловые деформации.

При пересечении неглубоких долин каналами с небольшими расходами проектируют акведуки из унифицированных лотков и других деталей.

Гидравлический режим лотка акведука проектируют равномерным со скоростями (1...2,5 м/с) несколько большими, чем в подводящем и отводящем каналах, — это исключает большие потери в командовании на оросительных системах. Входная и выходная части должны обеспечивать плавный переход от канала к более узкому лотку акведука на входе и, наоборот, при выходе с лотка. Поэтому в плане входную часть проектируют в виде сужающегося конуса с обратной стенкой, аналогично проектируют выход в виде расширяющегося в плане раструба. Сопряжение лотка с каналом в вертикальной плоскости на входе и выходе также должно быть плавным, как показано на рисунке 3.7. Гидравлические и статические расчеты акведуков приведены в специальной литературе.

Селепроводы. В конструктивном отношении они схожи с акведуками (рис. 3.8). Это лотки, предназначенные для пропуска

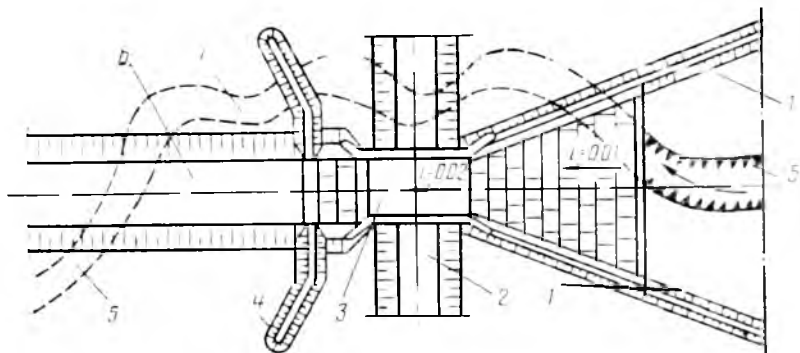


Рис. 3.8. План селепровода:

1, 4 — направляющие дамбы, укрепленные габионами; 2 — канал, пересекаемый селепроводом; 3 — лоток-акведук железобетонный; 5 — русло речки; 6 — русло, подводящее к лотку; 7 — засыпка русла

через каналы, дороги, реки селевых потоков, выходящих из горных ущелий. От акведуков они отличаются: входной частью, выполненной в виде сужающейся воронки с укрепленными железобетонными плитами откосами и дном для обеспечения плавного входа в лоток селевого потока; укрепленной и огражденной дамбами выходной частью в виде раструба; наличием струнаправляющих дамб как со стороны входа, так и на выходе с лотка, обеспечивающих плавный подвод и отвод селевого потока и предотвращающих прорыв его в сторону канала (дороги и др.); облицовкой лотка материалом, хорошо сопротивляющимся истиранию; повышенным уклоном лотка селепровода по сравнению с уклоном селевого потока на подходе с целью предотвращения накопления продуктов выноса в лотке и перед ним.

Если лоток акведука может быть перекрытым сверху плитами, то в селепроводе это недопустимо. Сложным вопросом при расчете селепровода является достаточно точная оценка селевого паводкового расхода и его изменения во времени.

Иногда на основе технико-экономического расчета удобнее селевой поток пропустить над каналом без возведения селепровода, а канал заключить в трубу (дюкер) под руслом селевого потока.

Лотки. Устраивают их, когда по трассе канала вследствие неблагоприятных топографических условий (косогор, например), геологических и гидрогеологических характеристик грунта (неустойчивые грунты, выходы скальных пород, высокое стояние уровня грунтовых вод и др.) разработка канала оказывается дороже, чем их устройство. Лоток — это искусственное русло, выполненное из бетона или железобетона, дерева, стали, расположенное непосредственно в грунте (рис. 3.9) или на эстакаде. На оросительных системах лотки устраивают вместо каналов (магистральных, межхозяйственных, внутрихозяйственных) с целью уменьшения потерь на фильтрацию и обеспечения командования уровней воды над орошаемой территорией. Расход таких лотков — $0,5 \dots 5 \text{ м}^3/\text{с}$, расстояние между опорами $3 \dots 5 \text{ м}$. Нарушение стыков, приводящее к большим потерям воды, а иногда и к подмыву опор, является усложняющим фактором их эксплуатации.

Движение потока в лотках принимают равномерным, скорости потока выше, чем в земляных каналах, поперечное сечение меньшей площади. Лотки могут быть трапецеидального поперечного сечения, прямоугольного и составного; сечение лотков оросительной сети — параболическое (может быть циркульное и даже треугольное).

Деревянные лотки на эстакадах возводят в районах, богатых лесом. По конструкции они похожи на акведуки.

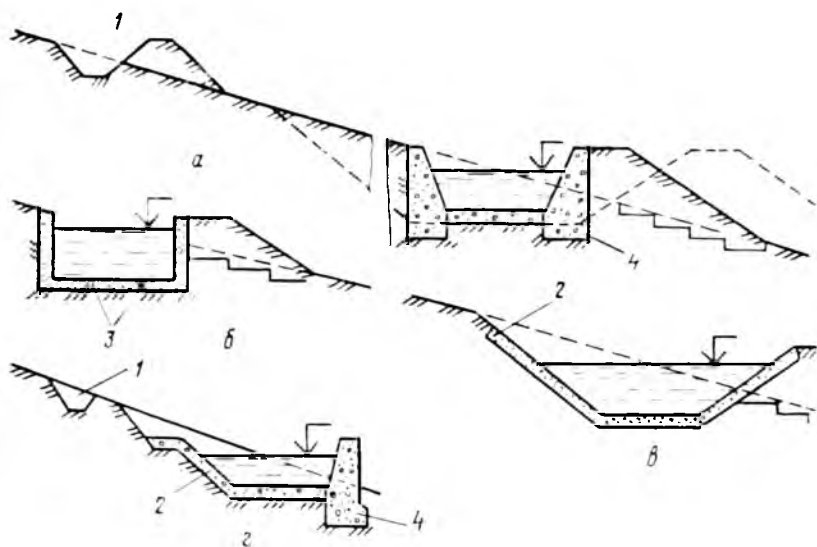


Рис. 3.9. Лотки на косогоре:

а — монолитный; б — сборно-блочный; в — облицованный; г — составного поперечного сечения; 1 — нагорный канал; 2 — облицовка монолитная или сборная плитами; 3 — Г-образные блоки; 4 — подпорная стенка

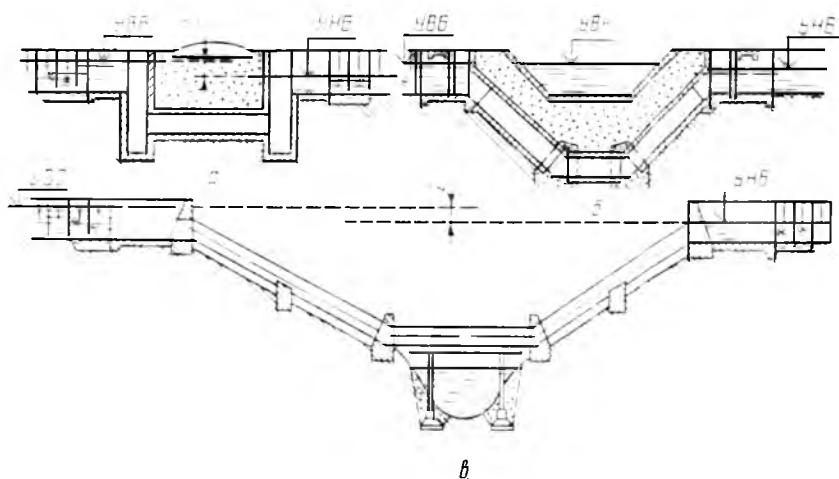


Рис. 3.10. Железобетонные дюкеры:

а, б — закрытые; в — открытый, пересекающий глубокую и широкую долину; г — действующий напор

Железобетонные лотки могут быть монолитными и сборными, открытыми и закрытыми.

Металлические лотки (стальные) отличаются высокой механической прочностью, водонепроницаемостью, быстротой сборки и монтажа. Поперечное сечение их полукруглое (а для больших — с вертикальными боковыми стенами и криволинейным дном). Вследствие коррозии стали срок службы их лишь около 15 лет, кроме того, они дороже.

Дюкер. Это напорный трубопровод, прокладываемый на канале при встрече его с препятствием (рекой, каналом, железной или шоссейной дорогой, суходолом). В большинстве приведенных примеров уровни воды в канале и преодолеваемые с помощью дюкера преграды имеют близкие отметки (рис. 3.10). Может быть и такой случай, когда канал пересекает речную долину или суходол, а использовать акведук невозможно, так как опоры его получаются слишком высокими, а вся конструкция — дорогостоящей, следовательно, целесообразно применять дюкер (см. рис. 3.10).

По используемым материалам дюкеры бывают *бетонные, железобетонные, стальные, деревянные и комбинированные* (когда используется ряд материалов для их изготовления). Бетонные дюкеры устраивают при напорах 30...50 м, а дюкеры из предварительно напряженного железобетона — до 100 м. При давлении в трубе 1 МПа и более, а также когда трасса дюкера проходит в просадочных грунтах, в сейсмичных районах используют стальные трубы с железобетонными опорами на криволинейных участках, сборные конструкции выполняют из унифицированных круглого или прямоугольного поперечного сечения элементов.

По числу трубопроводов (ниток) дюкеры различают на *одноочковые* и *многоочковые*. По условиям эксплуатации и производства работ дюкеры могут быть *заглублены в грунт* или *уложены по поверхности*. Выбор варианта основывается на технико-экономическом расчете.

К конструкции дюкера предъявляются следующие требования: возможность осмотра, ремонта, очистки сооружения в период эксплуатации; водонепроницаемость в стыках труб, а также между трубами и оголовками, включая и при неравномерной осадке основания; обеспечение опорожнения откачкой на период ремонта и выключения канала; отвод фильтрационных и других вод за пределы сооружения.

При проектировании дюкера скорости (1,5...4 м/с) в трубах принимают из условия его незаиливания (минимальные) и предельно допустимых потерь напора в сооружении (максимальные); необходимо поддержание равномерного режима в подводящем канале. Число ниток трубопроводов должно обес-

печивать допускаемые скорости при изменении расхода; в трубах не допускается образование прыжка, а перед ними — воронок.

Входной и выходной оголовки открытого дюкера размещают на естественном основании, чтобы была обеспечена фильтрационная прочность грунта основания и обратных засыпок. Расстояние между трубами должно быть таким, чтобы межтрубное пространство при засыпке уплотнялось нормально. При прямоугольном сечении труб многоочкового дюкера секции труб можно выполнять в виде одного блока — коробки.

Гидравлический расчет дюкера выполняют, как для напорной трубы, с учетом всех потерь напора (на входе и выходе, на поворотах, по длине трубы), а также проверяют возможность образования гидравлического прыжка на входном участке.

При работе в зимних условиях проводят термический расчет на обледенение и проверку пропускной способности.

Трубы-ливнепроводы. Они служат для пропуска различных небольших водотоков (ручьев, ливневого стока, талых вод) под каналами, авто- и железнодорожными насыпями. Для пропуска селевых потоков их использовать нельзя, так как трубы могут засориться.

Трубы-ливнепроводы изготавливают из железобетона, бетона, камня, кирпича и металла. В мелиоративном и дорожном строительстве наиболее распространены железобетонные сборные трубы круглого поперечного сечения. Они выполнены из звеньев диаметром 0,5...2 м, длиной до 1 м, массой до 1 т. Применяют также железобетонные овоидальные трубы шириной 1...6 м и высотой до полутора ширины в зависимости от пропускной способности. Железобетонные трубы прямоугольного поперечного сечения целыми звеньями или из опрокинутых Г-образных блоков, соединенных в полурамы, прикрытых сверху съёмными плитами, получают все большее распространение. По числу ниток трубы-ливнепроводы могут быть одноочковые и многоочковые.

По характеру гидравлического режима трубы подразделяют на *напорные*, *полунапорные* и *безнапорные* (рис. 3.11). Предпочтение отдают безнапорному режиму. При пропуске паводковых, ливневых расходов редкой повторяемости допускается временное затопление верхней кромки входного оголовка трубы с образованием в трубе полунапорного или напорного режима.

Концевые участки трубы для обеспечения плавного впуска и выпуска воды оснащены оголовками, дно русла перед трубой и особенно за нею крепят. Труба может быть с фундаментом или без него, что определяют инженерно-геологическими условиями основания.

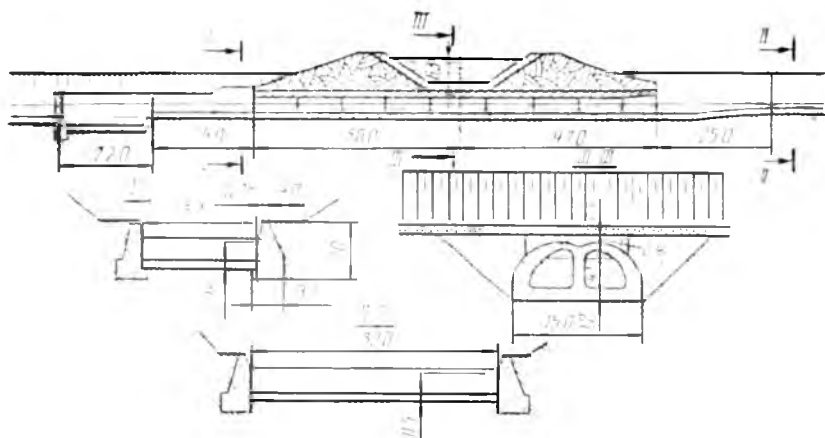


Рис. 3.11. Труба двухочковая под каналом в насыпи (размеры в м)

Сверху трубы покрывают гидроизоляционным слоем в виде различных битумных покрытий (толь на битуме или просмоленная мешковина на слое битума и др.) или слоя мягкой глины толщиной 15...20 см. Бровка дороги должна быть не менее чем на 0,5 м выше подпорного уровня перед трубой, если режим в трубе безнапорный, и не менее 1 м, — работающей в напорном или полунпорном режиме. Гидравлический расчет труб под насыпями, дорогами, каналами состоит из расчета пропускной способности собственно трубы для соответствующего режима и проверки условий сопряжения потока при выходе из трубы с устройством соответствующих конструктивных элементов (водобойного колодца, растекателей, пирсов, гасителей и крепления участка русла для защиты от подмыва сооружения).

Статический расчет труб и оголовков выполняется по двум предельным состояниям: по несущей способности (первое предельное состояние) и по допустимым деформациям с учетом образования трещин (второе предельное состояние). Расчеты ведут для строительного периода и периода эксплуатации при основном и особом сочетании нагрузок. Для труб под дорожными насыпями учитывают подвижную нагрузку по дорожному полотну.

Гидротехнические туннели. Это закрытый водовод, проложенный в земной толще без удаления грунта, расположенного над ним. Туннели чаще всего возводят в горных условиях, когда трасса канала или водосбросного тракта должна пересечь возвышенность, обход которой по косогору неприемлем по технико-экономическим соображениям. Туннели строят также на

равнинах при пересечении трассой канала водораздела, при гидроузлах с высокими плотинами в качестве водосбросов.

В нашей стране построены и успешно эксплуатируются туннели на таких гидроузлах, как Ингурский, Чарвакский, Токтогульский, Нурекский и др.

По назначению гидротехнические туннели различают: энергетические, ирригационные, обводнительные, водопроводные и канализационные, судоходные и лесосплавные, водосбросные строительные и эксплуатационные, комбинированные.

По гидравлическому режиму потока в сооружении туннели бывают *безнапорные* и *напорные*.

Форму поперечного сечения туннеля принимают, учитывая инженерно-геологические условия массива, по которому его трассируют, гидравлические условия, технологию производства работ по их возведению с возможно малой стоимостью.

Площадь поперечного сечения туннеля определяют гидравлическим расчетом по формулам гидравлики для водоводов. Туннельная выработка (выемка породы по форме поперечного сечения туннеля) существенно влияет на прочность окружающей породы: напряженное состояние окружающей породы изменяется, в породе могут возникнуть растягивающие напряжения, что может привести к деформации породы, а при недостаточной ее прочности — к обрушению. Для предотвращения таких нежелательных явлений по контуру выработки при проходке устраивают временную крепь, которую затем заменяют обделкой, способной воспринять давление деформирующейся породы или горное давление. Таким образом, под горным давлением понимают силы, возникающие в породах, окружающих туннельную выработку и приводящие к деформации этих пород. Горное давление может развиваться как в *вертикальном* направлении, так и под некоторым углом к горизонтальной плоскости — *боковое* горное давление, вызывающее деформации боковых вертикальных стенок выработки. Оно зависит от ряда факторов: геологических и гидрогеологических условий района работ; физико-механических свойств пород, формы и размеров поперечного сечения выработки, расположения оси трассы (горизонтальное, вертикальное, наклонное), а также времени от момента завершения выработки до установки обделки.

Теоретическое определение горного давления возможно лишь приближенно и служит для предварительных расчетов. При проектировании туннелей ответственных сооружений горное давление определяют опытным путем непосредственно в туннельных выработках. Имеются и лабораторные методы.

Для расчетов используют метод М. М. Протодяконова, горные породы по которому характеризуются коэффициентом крепости f , составляющим от 0,3...0,6 для плывунов до 20 и

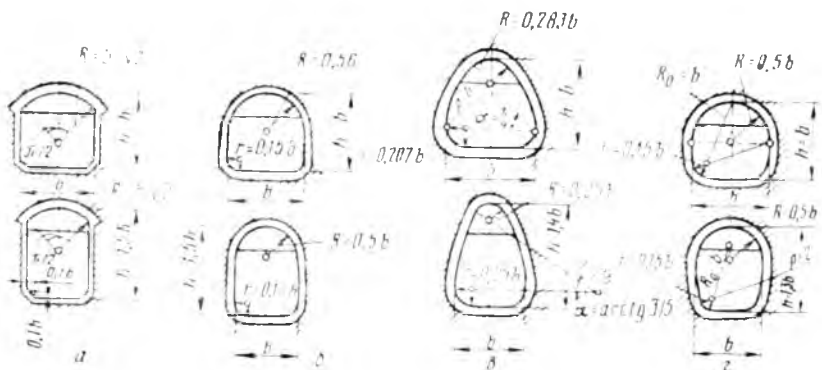


Рис. 3.12. Поперечные сечения безнапорных туннелей:

b — ширина туннеля в свету; h — высота туннеля

более для скальных горных пород (базальт, порфирит, габбро и т. д.).

Безнапорные туннели. Строят их, когда колебания уровней воды перед входом в туннель невелики и безнапорный режим выгоден по гидравлическим условиям и экономическим соображениям. Наиболее выгодная с точки зрения пропускной способности форма поперечного сечения в заполненной водой части — это круглое и прямоугольное с закругленными углами.

Основные типы поперечных сечений показаны на рисунке 3.12, а для горных пород с $f \geq 8$ (туннели небольших размеров в прочных скальных породах); на рисунке 3.12, б — для $8 > f > 4$ (небольшое вертикальное горное давление); на рисунке 3.12, в — для $f = 2 \dots 3$ (довольно большое вертикальное горное давление и небольшое боковое) и на рисунке 3.12, г — для $f < 2$.

Круглое поперечное сечение рекомендуется при наклонном или переменном напластовании горных пород. Минимальные размеры туннелей в свету принимают: диаметр $d = 2$ м; при наличии обделки — ширина в свету $b = 2$ м; высота $h = 2,5$ м и для круглого сечения $d = 2,5$ м. Расстояние от поверхности воды до верхней кромки сечения при скорости установившегося движения не более 10 м/с должно быть не менее 0,07 высоты (но не менее 0,4 м) при условиях подвода воздуха в воздушную зону.

Обделку безнапорных туннелей, проложенных в прочных породах, осуществляют для уменьшения шероховатости стенок (иногда ее не делают); в трещиноватых породах — для обеспечения водонепроницаемости стенок, а в слабых породах наряду с указанным — для защиты выработок от опасных деформаций пород, обрушения кровли и стенок.

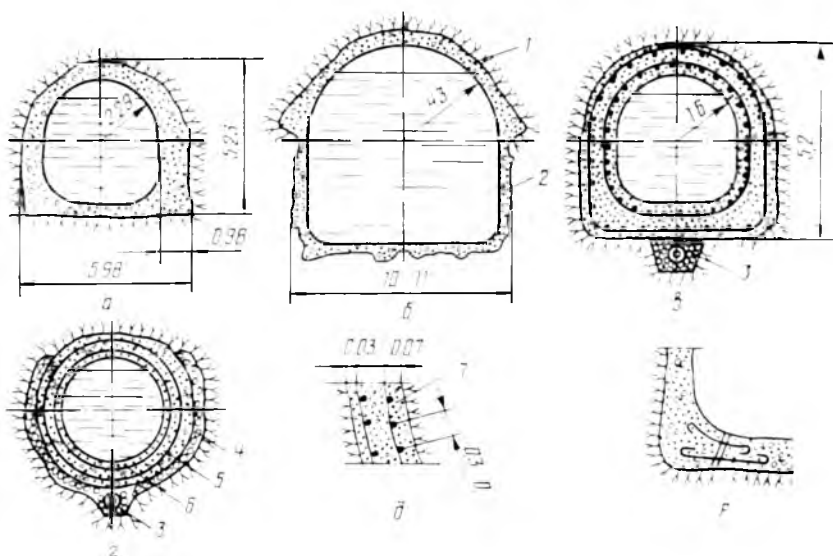


Рис. 3.13. Обделки безнапорных туннелей:

а — бетонная; *б* — бетонная в верхней части, в нижней — облицовка; *в* — железобетонная с двойной арматурой; *г, д* — предварительно напряженная, то есть напряженно-армированная и бандажированная; *е* — конструкция шва; 1 — обделка; 2 — облицовка; 3 — дренаж (поперечная и продольная дрены); 4, 5, 6 — кольца — внешнее бетонное и внутренние железобетонные; 7 — рабочая арматура (размеры в м)

Обделки бывают бетонные и железобетонные, их основные типы в монолитном исполнении приведены на рисунке 3.13.

Бетонные обделки используют в плотных малодеформирующихся породах со средней и малой крепостью и умеренным горным давлением. Устраивают их или по всему периметру (см. рис. 3.13, *а*), или только в верхней части (см. рис. 3.13, *б*). Железобетонные обделки применяют в слабых породах при значительном горном давлении (см. рис. 3.13, *в*), в этом случае растягивающие напряжения в бетоне превышают допускаемые. Они могут быть монолитными из армированного набрызг-бетона или сборными (из отдельных блоков для пролетов до 3 м либо из отдельных колец).

В обделках (рис. 3.14) можно предварительно создавать сжимающие напряжения (близкие по значению к величинам растягивающих напряжений от эксплуатационных нагрузок), что улучшает условия работы: повышается трещиностойкость, водонепроницаемость, удлиняется срок службы, появляется возможность уменьшить толщину обделки. Такие предварительно напряженные обделки бывают двух типов:

напряженно-армированные с бандажами, сжатие обеспечивается натяжением арматуры или бандажей (см. рис. 3.14, а); обжатые за счет нагнетания цементного раствора в специальный зазор между обделкой и выравнивающим слоем бетона (см. рис. 3.14, в). Предварительно напряженные обделки могут быть монолитными и сборными.

Статические расчеты обделок гидротехнических туннелей выполняют согласно СНиП по предельным состояниям: по несущей способности, по допустимым деформациям — на трещиностойкость, если трещины не допускаются, или на раскрытие трещин, если это допустимо исходя из условия долговечности

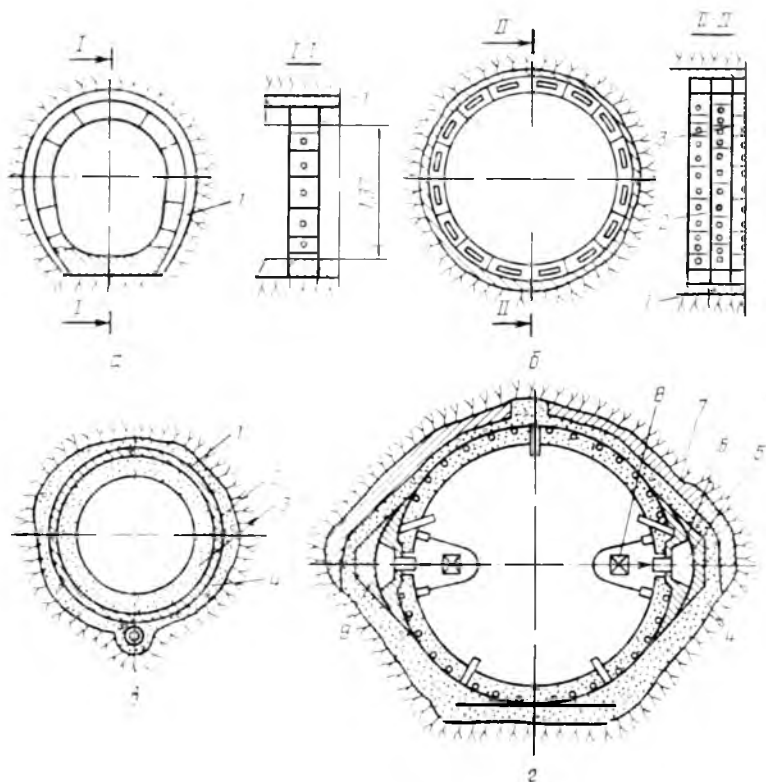


Рис. 3.14. Конструктивные схемы сборных и предварительно напряженных обделок:

а, б — из отдельных блоков; в — обжатая комбинированная обделка напорного туннеля с внешним бетонным кольцом; 2 — предварительно напряженная с домкратами; 1 — цементный раствор; 2 — отверстие для сборки и нагнетания цементного раствора; 3 — кольцо; 4 — внешнее бетонное кольцо; 5 — грибовидные вкладыши; 6 — трубка для нагнетания цементного раствора; 7 — трос (бандаж); 8 — домкрат; 9 — цементный раствор (размеры в м)

обделки, сохранности массива породы и фильтрационного расхода из туннелей. Основные силы, действующие на обделку: горное давление, собственный вес обделки, зависящий от ее толщины (которую принимают по аналогии с имеющимися туннелями или по графикам).

Напорные туннели. Применяют их при больших колебаниях уровней в водохранилище, из которого вода поступает в туннель, и если по топографическим, геологическим условиям невозможна экономически обоснованная трасса безнапорного туннеля, а также если необходимо по условиям работы сооружения, в которое подается вода из туннеля (например, ГЭС). Для напорных туннелей характерно значительное внутреннее гидростатическое давление. Поэтому наиболее часто применяют напорные туннели с круглой формой поперечного сечения.

Статические расчеты обделок напорных туннелей выполняют поэтапно на отдельные виды нагрузок:

однослойную круговую обделку на *внутреннее гидростатическое давление* (с учетом упругого отпора породы);

круговую однослойную отделку на *вертикальное и боковое горное давление, собственный вес обделки, на давление воды*, заполняющей туннель без напора, и на *давление подземных вод* (с учетом упругого отпора породы, но без учета трения). После окончания расчетов от различных нагрузок полученные напряжения суммируют.

При расчетах туннелей все более широко используют метод конечных элементов, реализуемый с помощью ЭВМ.

Предварительно толщину обделки, как и для безнапорных туннелей, можно назначать согласно аналогичным сооружениям или пользоваться специальными графиками.

Место начала туннеля в лобовом откосе выемки называют *врезкой* туннеля, а постоянное сооружение, сопрягающее канал (вход) с трубой туннеля, *порталом* или *оголовком*. В каждом туннеле имеются *входной* и *выходной порталы*, задачей которых является создание плавного подхода к туннелю и от него к водоводу; обеспечение гашения избыточной энергии потока при выходе из туннеля; регулирование расхода, обеспечение сопряжения с концевым участком обделки. Портал состоит из подпорной стенки, сопрягающейся с начальным участком туннеля и поддерживающей откос горного массива, боковых подпорных стенок, ограждающих боковые откосы врезки и сопрягающихся с откосами подводящего канала (при входе) или с водобойной частью (при выходе). Участки канала на подходе к туннелю или отходе от него закрепляют от размыва. Выходные порталы туннелей высоконапорных узлов оснащают конусными затворами.

3.3.3. СОПРЯГАЮЩИЕ СООРУЖЕНИЯ

Сопрягающие сооружения служат для пропуска водного потока на трассе каналов с сосредоточенным падением местности или входят в состав водосбросного тракта открытых береговых водосбросов (см. гл. 5) гидроузлов с глухими плотинами.

Основное назначение сопрягающих сооружений — гашение кинетической энергии потока при транспортировании его с более высоких отметок на низкие с большим уклоном.

Сопрягающие сооружения по условиям пропуска воды можно разделить на две группы: с движением потока без отрыва от сооружения на всем его протяжении — *быстротоки* и *трубы*; с движением потока на части пути без отрыва от стенок сооружения и на части пути в воздухе — *ступенчатые* и *консольные перепады*. Имеются и промежуточные формы сооружений: *быстротоки-перепады*, *трубчатые перепады* и др.

Основные принципы гидравлических условий работы сопрягающих сооружений сходны с принципами работы других водопроводящих сооружений. В каждом сопрягающем сооружении поток перемещается с верхнего участка канала в нижний, обеспечивая гашение его избыточной энергии специальными устройствами. При эксплуатации сопрягающих сооружений должны быть обеспечены следующие требования:

- благоприятный режим работы его основных частей;
- прочность и устойчивость сооружения и его элементов;
- создание такой конструкции сооружения, которая давала бы экономию строительных материалов;
- применение современной технологии строительства с обеспечением его эксплуатационной надежности.

Гашение кинетической энергии потока в сопрягающих сооружениях осуществляется различными путями: значительным увеличением гидравлических сопротивлений по пути движения потока; затоплением гидравлического прыжка на ступени или специальными гасителями, методом соударения струй жидкости, применением энергогасящих диффузоров, отбросом струи со ступени на ступень с соответствующим гашением энергии на каждой ступени, отбросом струи с концевой части транзитного участка с помощью специальной консоли с последующим гашением ее энергии в воронке размыва. Тип сооружения выбирают с учетом приведенных требований на основе технико-экономического сравнения вариантов.

Быстротоки. Это выполненный в бетоне или железобетоне лотковый или трубчатый канал постоянной или переменной ширины с уклоном более критического. Значительный уклон обеспечивает бурный или сверхбурный режим на быстротоке. Конструкция быстротока проста, технологична и экономична,

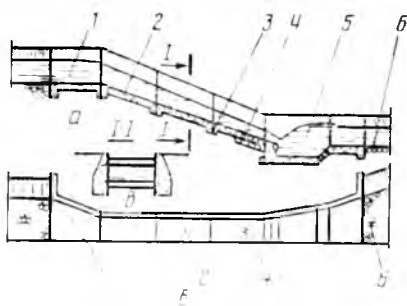


Рис. 3.15. Быстроток:

а — продольный разрез; *б* — поперечный разрез; 1 — вход; 2 — лоток; 3 — зуб; 4 — дренаж; 5 — водо-бойный колодец; 6 — рисберма

благодаря чему эти соору-жения являются самыми распространенными сопрягающими сооружениями.

Размеры поперечного сечения и уклон дна быстро-тока принимают с учетом топографических, геологических усло-вий его трассы в увязке с гидравлическим расчетом.

Бетонный или железобетонный быстроток эффективен (по прочности его материала), если удельный расход составляет $10 \text{ м}^3/\text{с}$ и более на 1 м ширины лотка.

Быстроток (рис. 3.15) состоит из входного, транзитного и выходного участков. Вход — открытый регулятор, или щелевой водослив, или сужающаяся в плане плавноочерченная конфу-зорная воронка. Размеры пролетов открытого регулятора про-ектируют небольшой ширины, чтобы оборудовать их ручными подъемниками или электрическим приводом небольшой мощ-ности. Устройство щелевого водослива обеспечивает поддержа-ние в канале перед входом заданных глубин.

Входной участок — воронка, сужающаяся в плане (см. рис. 3.15), также способствует устранению резкой неравномерности глубин при переходе потока из канала к быстротоку.

Транзитный участок (лоток, водоскат) — наиболее протя-женная по длине часть сооружения. При его трассировке ста-раются придать ему минимальную длину и уклон, соответст-вующий естественному уклону местности. Наименьший объем земляных работ обеспечивается, когда ось трассы принимает перпендикулярно горизонталям. Скорости на водоскате быстро-тока могут достигать $12 \dots 23 \text{ м/с}$ и более. Поэтому материал, из которого выполняют боковые стенки и дно быстротока, дол-жен соответствовать условиям течения потока. В большинстве случаев это бетон или железобетон. При больших уклонах ($0,15$ и более) и значительных длинах транзитной части быстро-токи делают не гладкими, а используют искусственную ше-роховатость. Методы гидравлического расчета быстротоков как с искусственной шероховатостью, так и без нее подробно рас-смотрены в справочной литературе.

Поперечное сечение транзитного участка по гидравлическим условиям предпочтительнее прямоугольное, так как при дру-гих его формах струя концентрируется вдоль осевой части по-

тока, что увеличивает вероятность возникновения стоячих волн, образования боковой раскачки потока. Катящиеся волны могут появляться при прямоугольной или трапецидальной формах поперечного сечения. Имеются «безволновые» профили поперечного сечения (треугольное, полигональное, полукруглое и другие более сложные), однако они не всегда удобны по условиям производства работ, и по этому признаку наиболее простым можно считать трапецидальное поперечное сечение.

В поперечном сечении лоток можно выполнять в виде разрезной конструкции, когда плита толщиной 0,5...0,8 м сопрягается с боков деформационными швами с двумя подпорными стенками (см. рис. 3.15), в продольном направлении и плита и стенки через 10...20 м также разделены деформационными швами, обеспечивающими водонепроницаемость в месте контакта, а также независимую осадку соединяемых элементов.

Если быстротоки располагают в слабых или обладающих неравномерными осадками грунтах, то поперечное сечение лотка-водоската выполняют в виде жесткого монолитного коробчатого (иногда его называют доковым) поперечного сечения, а деформационные швы располагают между секциями лотка.

Для снятия давления фильтрационного потока на дно и боковые стенки (или на коробчатую конструкцию лотка) вдоль быстротока предусматривают застенный дренаж с выводом его в лоток в концевой части или в отводящий канал.

Выходные участки (концевые) быстротоков должны обеспечить сопряжение высокоскоростного бурного потока, сходящего с бетонного водоската, с потоком часто необлицованного отводящего канала,двигающегося с невысокими скоростями (0,5...0,8 м/с). Это обычно водобойный колодец, расширяющийся в плане с тангенсом угла роспуска его боковых стенок 0,14...0,25, но может быть колодец с водобойной стенкой. Если водобойную часть выполняют в виде расширяющейся в плане воронки с большим углом роспуска, то предусматривают устройство продольных порогов-растекателей, которые начинаются в зоне сопряжения лотка быстротока с водобойным колодцем, а заканчиваются у водобойной стенки. Достаточно два таких порога-растекателя, расположенные симметрично продольной оси колодца на расстоянии от нее (0,17...0,25) b (где b — ширина колодца).

Используют и другие конструкции, способствующие более активному гашению энергии потока на водобое, установку гасителей различного типа, пирсов и т. д. За водобойной частью делают рисберму, которую сопрягают с отводящим каналом.

Трубчатые быстротоки. Эти сооружения с безнапорным режимом работы получают все большее распространение. Трубы, выполняющие функцию транзитного участка, делают из желе-

зобетона или монолитными, или сборными. В трубчатых быстротоках практически отсутствуют такие нежелательные явления, как разбрызгивание воды из лотка, образование волн различного типа и т. п.

Быстротоки из сборных элементов строят из унифицированных деталей, число типоразмеров увязывают с повторяемостью их применения на единицу площади (орошения или осушения), то есть чем меньше повторяемость типоразмера, тем меньшее число их принимают. Сооружения небольшой повторяемости строят сборно-монолитными или монолитными (по индивидуальному проекту). Имеются разработанные проектными организациями типовые сопрягающие сооружения для мелиоративного строительства.

Перепады. Возводят их, когда крутое падение местности или большие уклоны ($i \geq 0,20 \dots 0,25$) по трассе канала не позволяют в качестве сопрягающего сооружения использовать быстроток. Перепад, как и быстроток, состоит из входного, транзитного и конечного участков (рис. 3.16). Транзитный участок — система чередующихся вертикальных (ступеней) и горизонтальных участков. Иногда ступени могут быть наклонными.

Перепады по числу ступеней бывают *одноступенчатые* и *многоступенчатые*; по условиям работы — *безнапорные* (открытые), *напорные* и *полупапорные*. По используемым материалам перепады могут быть из бетона, железобетона, бутобетона, камня, дерева и хворостяных материалов. Общее число ступеней, высоту каждой сопрягающей стенки падения принимают в результате технико-экономического сравнения вариантов. Если высота падения по трассе канала не превышает 5 м, то принимают одноступенчатый перепад.

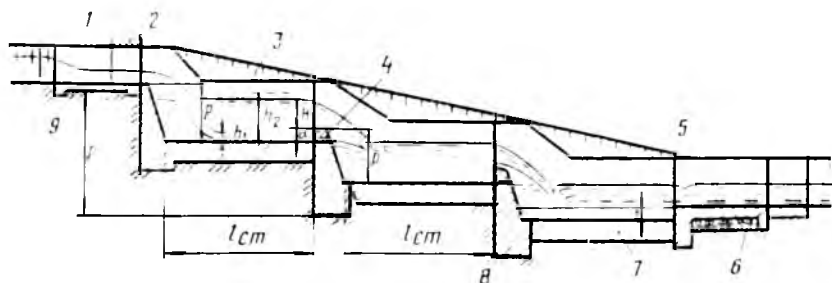


Рис. 3.16. Многоступенчатый перепад:

1 — входная часть; 2 — служебный мостик; 3 — водобойный колодец первой ступени; 4 — сливные отверстия; 5 — выходная часть; 6 — обратный фильтр; 7 — плита; 8 — стенка падения; 9 — понур; $l_{ст}$ — длина ступени; P — разность отметок дна перепада перед ним и за ним; p — величина падения, приходящаяся на одну ступень перепада; d — глубина водобойного колодца; H — напор над стенкой падения; h_1 — сжатая глубина; h_2 — сопряженная глубина

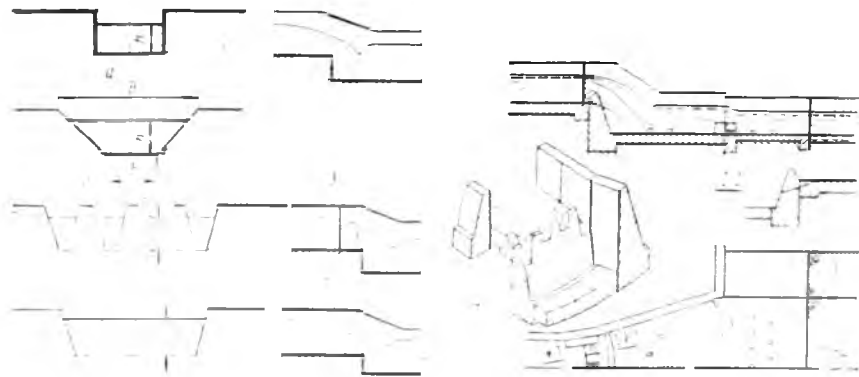


Рис. 3.17. Формы поперечных сечений входа в перепад:

а — прямоугольная; *б* — трапециевидная; *в* — щелевая; *г* — гребенчатая; *д* — выход из перепада; *1* — откосы подводящего канала; *2* — щель; *3* — гребни; *4* — стенка падения в перспективе; *б* — ширина перепада; *h* — глубина на входе

Открытые перепады. Они бывают прямоугольного и трапециевидного поперечного сечения. Наиболее распространено прямоугольное поперечное сечение, но оно при расходе менее расчетного и отсутствии затвора на входе ухудшает условия работы подводящего канала с образованием в нем кривой спада. Устройство гребенчатого (щелевого) входа или трапециевидного (рис. 3.17) предотвращает это явление. Ступень (стенку падения) выполняют либо в виде подпорной стенки, либо наклонно лежащей плиты. Горизонтальный участок ступени — плита — отделена от стенки падения и боковых стенок деформационными швами для обеспечения независимой осадки каждого элемента и создания благоприятного термонапряженного состояния.

Боковые стены — это обычные подпорные, которые могут быть массивными, уголковыми, контрфорсными и ячеистыми. Пазухи (области обратной засыпки) засыпают грунтом из полезных выемок или карьеров, не рекомендуется в этом случае использовать пылеватые, иногда глинистые грунты. Так же как и в быстротоках, здесь предусматривают застенный дренаж. Поперечное сечение перепада может быть и без швов, то есть коробчатого типа, тогда толщины стенок и плиты существенно меньше, так как их выполняют из железобетона. После выбора числа ступеней проводят гидравлический расчет для первой ступени, при этом вычисляют: сжатую глубину потока при его падении с плиты входного участка на первую ступень; сопряженную сжатую глубину по формуле сопряженных глубин при

гидравлическом прыжке; необходимую высоту водобойной стенки d (см. рис. 3.16), являющейся водосливом второй ступени; длину ступени и характер сопряжения потока на ней. В таком же порядке проводят расчет второй ступени, имея в виду, что высота падения отличается от таковой на первой ступени. Далее расчет продолжают в той же последовательности. Стремятся при расчете все ступени (кроме первой) делать одинаковыми, что упрощает и расчет, и производство работ. Выходной участок проектируют из тех соображений, что здесь осуществляется сопряжение перепада с отводящим каналом и затопление прыжка на водобое обеспечивается с более высоким запасом, чем на ступенях, за водобойной частью предусматривается рисберма.

Полунапорные перепады. Это перепады, имеющие небольшой участок напорного движения. От открытых перепадов они отличаются тем, что струя при падении на нижележащую ступень ударяется о забральную стенку или балку (рис. 3.18). Гашение энергии при этом происходит более интенсивно вследствие ее расщепления и искривления. Забральная стенка может быть выполнена в виде шандорных балок, снимаемых при пропуске льда или шуги по перепаду. Такие типы перепадов проектируют для нешироких сооружений.

Напорные трубчатые перепады (см. рис. 3.22). Их широко используют на каналах оросительных систем с небольшими расходами. Они имеют относительно высокую пропускную способность, так как работают в напорном режиме. Гашение энергии в НБ осуществляется применением несложных и недорогих мероприятий. Эти сооружения, как правило, совмещают с переездами через каналы.

Консольные перепады. Это быстроток с концевым участком в виде консоли (консольного свеса). Технично-экономическое сравнение этих сооружений со ступенчатыми перепадами, быстротоками показывает, что они дешевле. Сопряжение потока, падающего с концевого участка, осуществляют по типу отброшенной струи с гашением энергии в воронке размыва (рис. 3.19). Входной и транзитный участки по конструкции аналогичны быстротоку. Выходной участок на мягких нескальных основаниях (см. рис. 3.19) выполняют в виде лотка, размещенного над землей на опорах, заглубленных в грунт, а на скальном — в виде лотка-свеса. Консоль делают горизонтальной или с обратным уклоном, что обеспечивает необходимую дальность отлета струи.

Консоль устраивают в виде железобетонного лотка, жесткость которого обеспечивается системой продольных и поперечных балок, связанных с дном и бортами. По бокам бортов в виде свесов можно расположить служебные мостики. Для

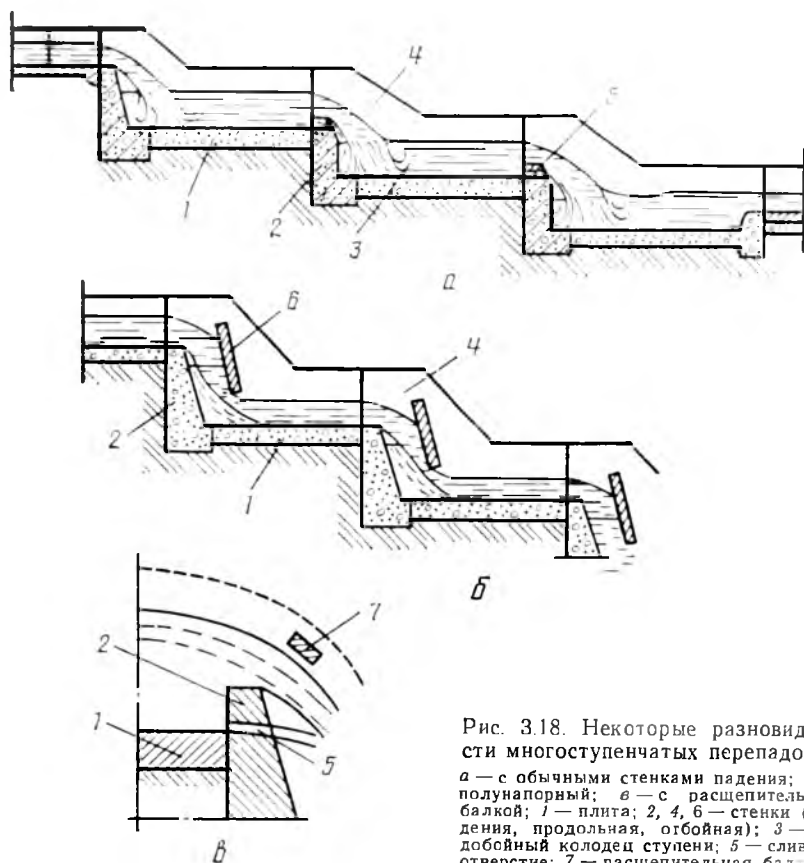


Рис. 3.18. Некоторые разновидности многоступенчатых перепадов:
а — с обычными стенками падения; *б* — полупроницаемый; *в* — с расщепительной балкой; 1 — плита; 2, 4, 6 — стенки (падения, продольная, отбойная); 3 — водобойный колодец ступени; 5 — сливное отверстие; 7 — расщепительная балка

уменьшения удельных расходов потока консоли в плане могут быть расширяющимися, с направляющими стенками, с носками-трамплинами. Опоры консоли делают в виде системы железобетонных свай или колонн с заглублением в грунт ниже отметок предполагаемого размыва. Предусматривают мероприятия, снижающие размыв и повышающие надежность работы сооружения. В мелиоративном и водохозяйственном строительстве применяют типовые проекты консольных перепадов.

Особенности возведения сооружений на просадочных, пучинистых грунтах и в районах вечной мерзлоты. Некоторые вопросы рассматриваемой темы представлены выше. Гидротехнические сооружения, возводимые на лёссовых просадочных грунтах (подвергающихся интенсивным просадкам и уплотне-

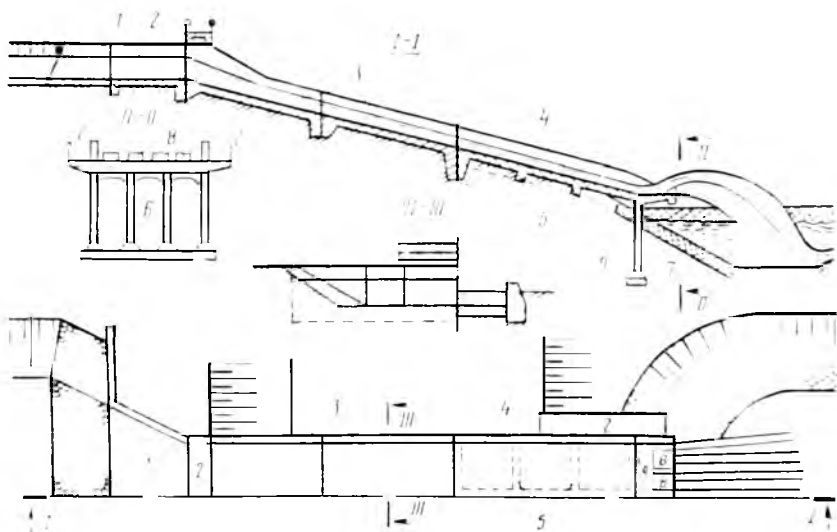


Рис. 3.19. Консольный перепад:

1 — вход; 2 — служебный мостик; 3 — лоток (бетонный или железобетонный); 4 — железобетонная часть лотка; 5 — балки жесткости; 6 — споры; 7 — габионное крепление; 8 — трамплины 9 — консоль (свес)

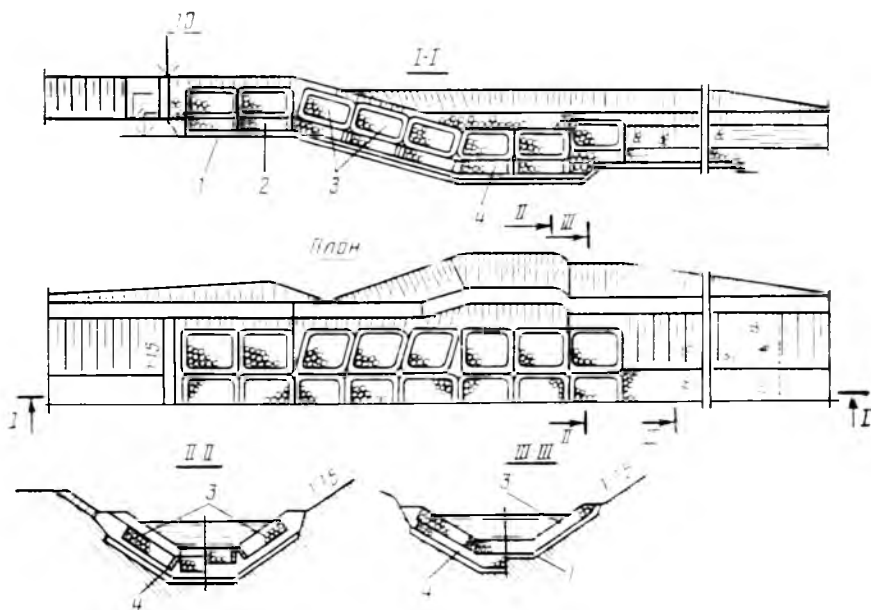


Рис. 3.20. Быстроток на пучинистом основании:

1 — песчано-гравийная подготовка; 2 — каменная наброска; 3 — полые железобетонные ящики; 4 — обратный фильтр

нию при увлажнении), возводят на искусственных или естественных основаниях. Искусственные основания создают предварительной замочкой грунта, устройством подушек из уплотненных лёссов. На естественных основаниях сооружения устраивают на сваях или используют конструкции, допускающие смещение отдельных элементов без нарушения условий надежной эксплуатации сооружения в целом.

Пример сопрягающего сооружения на пучинистых грунтах приведен на рисунке 3.20. Из рисунка видно, что часть грунта основания заменена непучинистым материалом, основание дренировано. Другие возможности строительства на пучинистых грунтах реализуются в конструкциях сооружений, состоящих из шарнирно сочлененных элементов, допускающих значительные смещения их относительно друг друга без нарушения условий нормальной эксплуатации, или в таких конструкциях сооружений, где исключена повышенная влажность грунта и морозное пучение (свайные фундаменты, порталные оголовки с горизонтальной плитой, интенсивное дренирование основания).

Сопрягающие сооружения на каналах в районах вечной мерзлоты проектируют, как и другие сооружения, с учетом одного из двух возможных принципов работы: сохранения основания в мерзлом состоянии на весь период эксплуатации сооружения и обеспечения талого основания путем его предварительного или постепенного оттаивания в период эксплуатации. Выбор температурного режима основания зависит от температуры вечномерзлого грунта, его льдистости, текстуры, зернового состава, режима работы сооружения, способа производства работ и экономических соображений.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ

1. Каково назначение каналов? Их классификация.
2. Для каких целей применяют регулирующие сооружения?
3. Назовите основные типы регулирующих сооружений, условия их применения и принципы работы.
4. Обоснуйте выбор типа узлов регуляторов. Основы компоновки.
5. Дайте классификацию водопроводящих сооружений и расскажите об условиях их применения.
6. Расскажите об условиях применения акведуков, основных их типах, особенностях работы входного участка, лотка и выхода.
7. Каково назначение и конструктивные особенности дюкеров? Задачи их гидравлического расчета.
8. Расскажите о гидротехнических туннелях, условиях их применения, классификации. Дайте понятие об обделках туннелей.
9. Для чего предназначены сопрягающие сооружения на каналах? Назовите их основные типы и условия применения.
10. Каково назначение быстротоков? Назовите их основные типы, особенности работы и конструкции входа, лотка и выхода.
11. Каковы особенности возведения и конструкций сооружений на каналах в особых условиях, например на пучинистых грунтах?

Глава 4. ПЛОТИНЫ

4.1. ПЛОТИНЫ ИЗ ГРУНТОВЫХ И ДРУГИХ МЕСТНЫХ МАТЕРИАЛОВ

4.1.1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О ГРУНТОВЫХ ПЛОТИНАХ

Плотины, которые возводят из местного грунта как строительного материала, называют грунтовыми (или земляными). Они получили широкое распространение, так как являются самыми экономичными. Используя местный грунт, их можно возводить практически во всех географических зонах, включая районы тропиков и вечной мерзлоты, строить любой высоты, возведение их высокомеханизировано; грунт, уложенный в тело такой плотины, не теряет со временем своих свойств. Однако грунтовые плотины имеют и недостатки. Перелив через гребень таких плотин для сброса паводковых расходов чаще всего не практикуют вследствие усложнения и повышения стоимости сооружения, через тело плотины осуществляется фильтрация, что потенциально создает условия для фильтрационных деформаций, ведет к большим потерям воды. При возведении таких плотин в районах сурового климата в зимнее время возникают трудности при производстве работ; в процессе эксплуатации грунтовые плотины имеют неравномерную осадку по поперечному профилю. Ограничено и использование некоторых типов грунтов для тела плотины и ее основания.

По способу производства работ грунтовые плотины бывают *насыпные* с отсыпкой грунта насухо пионерным способом с механическим уплотнением его катками; *с отсыпкой грунта в воду*, *намывные* и выполняемые посредством *направленного взрыва*.

Плотины подразделяют по конструкции тела плотины, противофильтрационных устройств в теле и основании на следующие основные типы: из однородного грунта и неоднородного грунта; с экраном (из грунтовых и негрунтовых материалов), с ядром из грунта, диафрагмой из негрунтовых материалов (рис. 4.1); с зубом, замком, диафрагмой в основании, со шпунтовой стенкой, с сочетанием зуба и шпунтовой стенки, с инъекционной завесой, понуром (рис. 4.2). В зависимости от высоты плотины, характера грунтов основания плотины делят на четыре класса, которые принимают согласно СНиП.

Выбор створа плотины зависит от различных факторов: топографических условий, инженерно-геологических и гидрогеологических условий (характера напластований грунтов, их

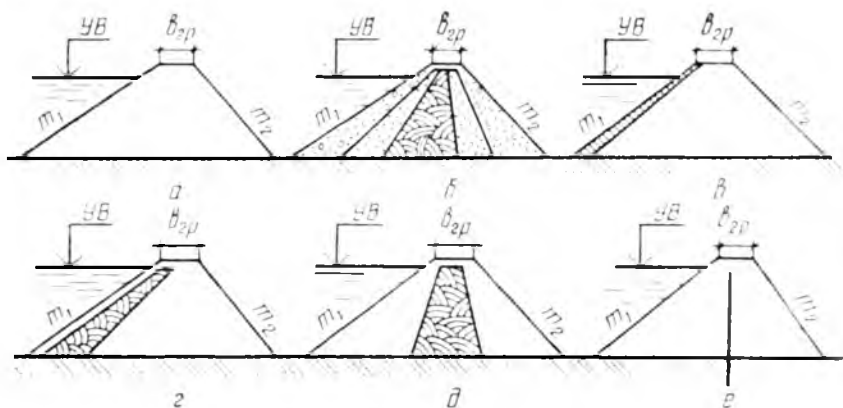


Рис. 4.1. Основные типы насыпных плотин из грунтовых материалов:

а — однородная (из грунта одного вида); *б* — неоднородная (из грунтов нескольких видов); *в* — с экраном из негрунтовых материалов; *г* — с экраном из грунта; *д* — с ядром из грунта; *е* — с диафрагмой; *b_{гр}* — ширина гребня; *m₁*, *m₂* — заложение верхового и низового откосов

прочностных и фильтрационных характеристик), местоположения карьеров грунтов для тела плотины, противофильтрационных устройств и дренажей, условий пропуска расходов реки строительного периода, местоположения и типа водосброса для пропуска паводковых расходов, наличия дорожной сети или возможности ее устройства, прокладки линий электропередач и др. Желательно створ плотины располагать на прямолинейном участке русла, в более узкой его части (с целью уменьшения объемов земляных работ), перпендикулярно горизонталям поверхности земли. При изысканиях рассматривают, с учетом приведенных выше положений, несколько створов, окончательный выбор створа проводят на основе технико-экономического сравнения вариантов.

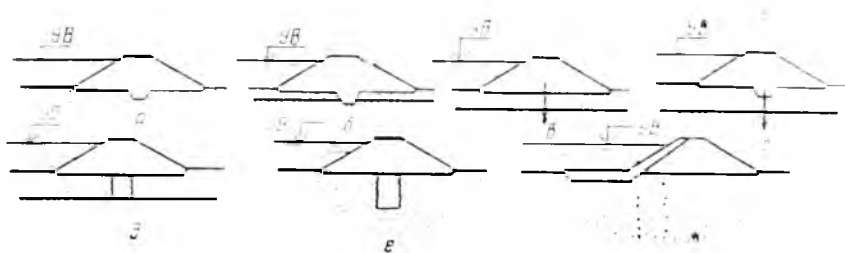


Рис. 4.2. Противофильтрационные устройства в основаниях грунтовых плотин: *а* — зуб; *б* — замок; *в* — шпунтовая стенка; *г* — шпунтовая стенка с зубом; *д* — инъекционная завеса; *е* — висячая инъекционная завеса; *ж* — понур с экраном

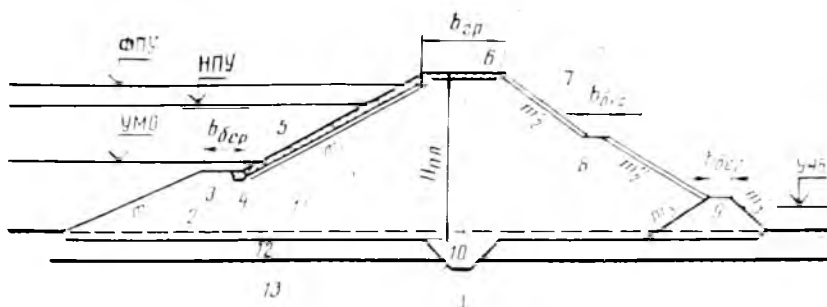


Рис. 4.3. Поперечный профиль грунтовой плотины:

1 — тело плотины; 2 — основание плотины; 3, 8 — бермы; 4 — упор; 5, 7 — крепление верхового и низового откосов; 6 — гребень; 9 — дренаж; 10 — замок; 11 — снятие растительного слоя; 12 — прослойка аллювия; 13 — водонепроницаемое основание; $b_{\text{бер}}$ — ширина бермы

Поперечное сечение плотины (рис. 4.3) напоминает собою трапецию, ее верхняя часть — гребень плотины, нижняя — подошву. По условиям рельефа подошва иногда может быть не горизонтальной, а наклонной. Поверхность плотины, обращенную в сторону водохранилища, называют верховым откосом, противоположную ей, то есть обращенную в сторону НБ, — низовым откосом. В водохранилищах при грунтовых плотинах в качестве характерных (расчетных) обычно имеются три уровня поверхности воды: ФПУ — форсированный подпорный, максимально возможный для данных условий, наблюдающийся обычно кратковременный период, то есть при прохождении паводка; НПУ — нормальный подпорный уровень, применительно к которому проводят расчеты фильтрации и устойчивости и принимают расчетные коэффициенты надежности; УМО — уровень мертвого объема, до которого осуществляют сработку водохранилища, то есть ниже его подача воды потребителю из водохранилища прекращается. Отметки указанных уровней обычно устанавливают водохозяйственными расчетами.

4.1.2. КРАТКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ГРУНТОВ ТЕЛА ПЛОТИНЫ И ОСНОВАНИЯ

Для тела плотины (при однородной плотине) или для основной части профиля (для плотин с ядром или экраном) практически пригодны все виды грунтов, кроме тех, которые содержат водорастворимые соли хлоридных или сульфатно-хлоридных соединений в объеме более 5% массы или соли сульфатных соединений более 2% массы грунта, а также содержащие не полностью разложившиеся органические веществ-

ва в аморфном состоянии более 8% массы грунта. Если в наличии имеются только грунты, содержащие водорастворимые соли или органические вещества, то их применение для тела плотины допускается при соответствующем обосновании и при необходимых защитных мероприятиях.

Основаниями для плотин из грунтовых материалов могут быть как скальные, так и нескальные. Требования к грунтам оснований такие же, как к грунтам тела плотины. Особое внимание при анализе грунтов основания обращают на наличие суффозионных грунтов. При основании из иловатых грунтов, где возможно появление порового давления, приводящего к снижению сопротивления сдвигу, в качестве защитных мероприятий предусматривают дренирование основания, уменьшение интенсивности возведения плотины и ограничение ее высоты. Если имеется торф, то его можно оставлять в основании при условии, что степень его разложения не менее 50%. Кроме того, должна быть учтена повышенная осадка основания при уплотнении торфа под нагрузкой при определении отметки гребня плотины. Подлежат удалению грунты с неразложившейся корневой системой, гумусированные почвы и грунты с ходами землеройных животных.

На основе опытных данных при статистической обработке материалов инженерно-геологических изысканий устанавливают расчетные характеристики грунтов. При предварительном проектировании можно использовать данные по грунтам из справочных материалов.

Для противофильтрационных устройств (ядро, экран, понур) используют грунты: глины, суглинки, глинобетон и негрунтовые материалы: асфальты, асфальтобетоны, полимерные пленки и др. Торф для устройства экранов и понуров применяют, если степень разложения его не менее 50%.

4.1.3. КОНСТРУКЦИИ ЭЛЕМЕНТОВ ПЛОТИН

Ниже рассмотрены основные элементы конструкции плотин.

Гребень. Обычно он служит проезжей частью. Ширина его зависит от категории дороги и принимают ее согласно СНиП. Если проезд по гребню не предусматривают, то его ширина $\geq 4,5$ м. Отметку гребня выбирают из условия недопущения перелива через него. Превышение гребня плотины (м) над расчетным уровнем воды в водохранилище вычисляют по зависимости

$$\eta_c = h_{run} + \Delta h + a, \quad (4.1)$$

где h_{run} — высота наката ветровой волны, м; Δh — ветровой нагон, м; a — конструктивный запас, принимают $\geq 0,5$ м.

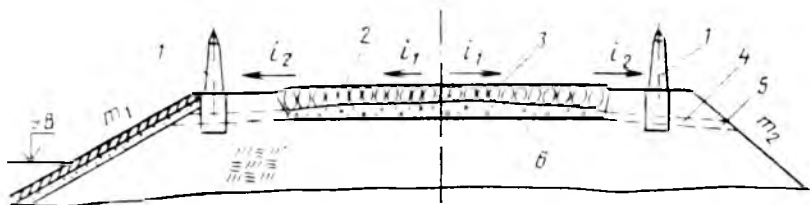


Рис. 4.4. Один из вариантов гребня плотины:

1 — ограждение-надолбы; 2 — одиночная мостовая; 3 — слой асфальта; 4 — дренажная воронка; 5 — обратный фильтр; 6 — основание дороги в виде песчаной подушки

Расчет проводят для двух уровней водохранилища ФПУ и НПУ, более высокую отметку принимают за расчетную. Если на гребне установлен парапет, то η_c принимают от его верха до расчетного уровня.

В конструктивном отношении гребень выполняют, как дорогу в насыпи, которая состоит из проезжей части, обочины, ограждения и дренажных устройств. Проезжая часть имеет основание и покрытие. На песчаную подушку укладывают покрытие в зависимости от категории дороги. Покрытие имеет двусторонний поперечный уклон (рис. 4.4). С обеих сторон дороги на расстоянии $\leq 0,5$ м от бровки ставят ограждения: столбики (надолбы) через 4...6 м, низкие стенки, парапет.

Откосы плотин. Тип грунта и его сдвиговые характеристики позволяют назначить заложение откосов, устойчивость их проверяют расчетом. Откосы плотин по высоте могут иметь переменное заложение у высоких, что позволяет экономно использовать грунт; в низких плотинах заложение принимают постоянным. На откосах в местах изменения заложения, на перемычках, включенных в тело плотины (см. рис. 4.3), по условиям производства работ выполняют бермы (горизонтальные площадки шириной 2,5...3 м). Бермы на низовом откосе с помощью кюветов перехватывают ливневые воды, на высоких плотинах (>15 м) бермы располагают через 8...15 м. При наличии берм на низовом откосе кривая депрессии фильтрационного потока оказывается более заглубленной, чем без берм. Низовой откос закрепляют для защиты от выветривания или посевом трав по растительному грунту, или одерновкой, чаще в клетку под углом 45° к бровке гребня или бермы с засевом травой внутриклеточных пространств по растительному грунту размером $1,5 \times 2,5$ м.

В районах жаркого сухого климата для этих целей используют гравийно-галечниковый грунт слоем 10...20 см. Крепят верховой откос для защиты его от разрушения ветровыми волнами. Крепление делят на основное, располагаемое в зоне

действия волновых и ледовых сил, и облегченное, размещаемое ниже и выше основного. Крепление состоит из покрытия, воспринимающего силовое воздействие, подготовки, выполненной обычно в виде обратного фильтра.

Для крепления верхового откоса применяют: каменную наброску (и каменное мощение), наброску из гравийно-галечниковых грунтов, бетонные и железобетонные плиты (сборные или монолитные), биологическое крепление. Водонепроницаемые покрытия рассчитывают на прочность и устойчивость, а водопроницаемые — на устойчивость от воздействия фильтрационного потока.

Водонепроницаемые каменные крепления (наброска) из камня изверженных и осадочных пород просты, прочны и морозостойки, легко осуществимы с применением средств механизации, их можно выполнять практически в любое время года, они гибки и легко восстанавливаются.

Покрытие в виде одиночной мостовой выполняют редко и при высоте ветровой волны менее 1,5 м. Удобны и надежны крепления в виде наброски из камня в клетки из бетонных сборных элементов, вынос нескольких камней приводит лишь к некоторым локальным разрушениям в одной клетке, которые легко восстановить.

При высоте волны не более 1,5 м применяют бетонные монолитные плиты. При большей высоте волны необходимо проводить расчет их прочности.

Железобетонные сборные или монолитные плиты используют при высоте ветровой волны более 1,5 м. Принятые расчетом размеры сборных железобетонных плит должны быть увязаны с грузоподъемностью транспортных средств и кранов. Плиты объединяют в карты, швы между плитами замоноличивают, а между картами делают деформационными, позволяющими им небольшие перемещения в случае неравномерной осадки и температурных деформаций. Верхнюю границу крепления обычно доводят до гребня, нижнюю границу основного крепления устраивают на две величины высоты волны ниже УМО и ниже подводной кромки льда. Облегченное крепление применяют ниже основного, его нижняя граница проходит там, где волновые скорости потока не опасны для неукрепленного грунта. Для того чтобы основное крепление не могло смещаться вниз, на его нижней границе делают упор (или на откосе плотины, или на берме).

При высоте волны до 1,5 м для различных грунтов можно делать пологие пляжные откосы с заложением от 1:10 до 1:30 без крепления.

Противофильтрационные устройства в теле плотин. Применяют их, когда плотину отсыпают из сильно

проницаемых грунтов (с коэффициентом фильтрации более 15...20 м/сут) для снижения фильтрационных потерь через плотину. Для создания противофильтрационных устройств используют грунты (суглинки, глины, глинобетон, торф), а также битумные составы, асфальтобетон, бетон и полимерные пленки.

Ядро из грунта можно располагать посредине тела плотины или смещать в сторону верхового откоса с целью повышения устойчивости низового откоса (большая часть профиля плотины получается сухой). Верх ядра должен быть выше ФПУ, но на таком расстоянии, чтобы исключить его промерзание со стороны гребня. Размеры ядра принимают из следующих соображений: наименьший — вверху не менее 0,8 м (по условиям производства работ), по низу $\delta = \Delta H / I$, (где ΔH — разность уровней депрессионной кривой за ядром и перед ним; I — допускаемый градиент фильтрационного потока грунта ядра). Минимальный размер ширины ядра по низу конструктивно принимают не менее 3,5 м.

Экран из грунта в отличие от ядра располагают по верховому откосу плотины под защитным слоем, обеспечивающим его непромерзание. Толщину экрана принимают аналогично ядру. И ядро и экран обычно врезаются в основание плотины.

Экраны из негрунтовых материалов постепенно получают широкое применение. Полимерные пленки достаточно прочные, химически инертные, хорошо склеиваются при сварке горячим способом. Если не допустить ее разрыва (с помощью компенсаторов), то пленка, уложенная на откос плотины с заложением $m \geq 3$ на слой подготовки из песка не крупнее 6 мм толщиной 0,3...0,5 м, прикрытая сверху также слоем песка, будет надежно выполнять свои функции.

Для экранов можно также использовать асфальтобетон, асфальт, который укладывают на поверхность откоса по слою подготовки.

Диафрагмы (вертикальные стенки) из бетона, железобетона, металла, дерева, асфальтобетона также защищают тело плотины от фильтрации. Применяют их при отсутствии грунтов для ядра экрана.

Противофильтрационные устройства в основаниях плотин. Они необходимы, если плотины возводят на проницаемых основаниях для уменьшения фильтрационных потерь и снижения градиентов напора. Эти устройства могут прорезать весь проницаемый слой до водоупора или быть висячими, не достигающими его.

Замок и зуб устраивают: первый — если водонепроницаемое устройство прорезает водопроницаемый слой (при его небольшой толщине $\leq 3...4$ м) и входит в водоупор, второй — если это устройство не доходит до водоупора. Зуб можно применять

в комбинации со шпунтовой стенкой. Замок выполняют, укладывая в траншею плотный суглинок, глину, трамбованную смесь — глинобетон. Зуб, особенно при устройстве со шпунтом, делают из бетона.

В скальных основаниях можно устраивать цементационные завесы, в основном висячие, и иногда стенки в виде глубокого зуба.

Сопряжение противофильтрационных устройств тела плотины и основания должно обеспечивать непрерывный водонепроницаемый фронт сооружения и основания. Обычно его выполняют из одного и того же грунта (см. рис. 4.3).

Понуры в ВБ в виде водонепроницаемой постели из суглинка или другого грунта, сопрягающейся с экраном, ядром или телом плотины, применяют редко, при глубоком залегании водоупора. Длину понура принимают с учетом допускаемых потерь на фильтрацию и отсутствия фильтрационных деформаций грунтов, минимальная толщина 0,5 м с утолщением в направлении к плотине. Сверху делается пригрузка из несвязного грунта для защиты его от повреждений во время строительства и промерзания.

Дренаж грунтовой плотины — конструктивный элемент для сбора и отвода воды, фильтрующейся через тело плотины (и основание в ряде случаев). Дренаж имеет повышенную проницаемость по сравнению с грунтами тела плотины и основания. Он понижает депрессионную кривую, предотвращает выклинивание фильтрационного потока на низовой откос и состоит из двух частей — приемной и отводящей.

Тип дренажа и его местоположение выбирают из условия обеспечения устойчивости низового откоса. Приемную часть дренажа целесообразно заглублять в тело плотины, хотя нужно иметь в виду, что это повышает стоимость дренажа, увеличивает градиенты и расход фильтрации. С другой стороны, желательно начало дренажа располагать так, чтобы расстояние от депрессионной кривой до поверхности низового откоса было бы больше глубины промерзания. Основные конструкции дренажа приведены на рисунке 4.5.

Наслонный дренаж не понижает депрессионную кривую, а только отводит фильтрационный поток. Представляет собою обратный фильтр на низовом откосе, его верх располагают выше выхода кривой депрессии на откос и выше высоты наката ветровой волны от уровня НБ. Применяют для русловой части плотин, работает он в паводковый период.

Дренажную призму применяют широко из-за простоты конструкции, надежной работы при любых уровнях НБ. Она обеспечивает отвод фильтрационной воды из тела плотины и основания, применяют в комбинации с наклонным дренажем (в па-

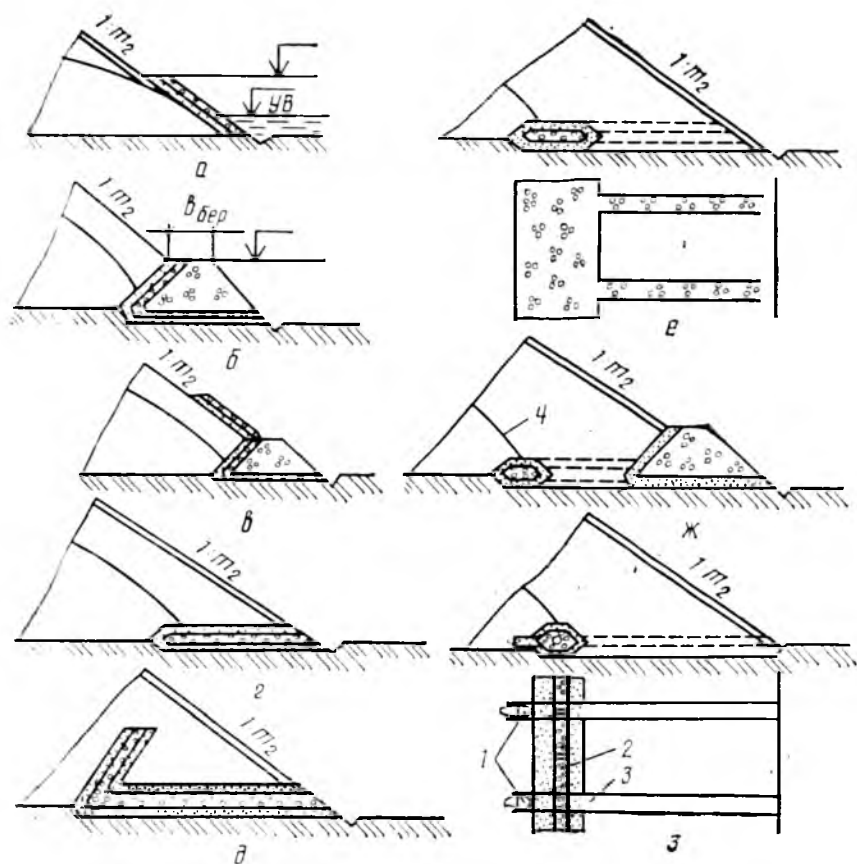


Рис. 4.5. Основные типы дренажей:

а — наклонный; б — дренажная призма (банкет); в — комбинированный (наклонный с дренажной призмой); г — плоский; д — плоский с вертикальной или наклонной приемной частью; е — ленточный; ж — комбинированный, ленточный с дренажной призмой; з — трубчатый; 1 — заглушки; 2, 3 — приемные (перфорированные) и отводящие трубы; 4 — депрессионная кривая

водок работает наклонная часть, в остальное время — призма).

Плоский горизонтальный дренаж в виде тюфяка, уложенного по типу обратного фильтра и со стороны тела плотины, и со стороны ее основания, устраивают, когда в НБ нет воды или при очень низких уровнях. Может быть наклонный участок в теле плотины (см. рис. 4.5), соединенный с основной постелью. Дренаж прост в исполнении и обеспечивает дренирование тела плотины и основания.

Ленточный дренаж — разновидность плоского, в котором приемная часть, имеющая вид ленты и расположенная вдоль

плотины, соединена отводящими участками, также имеющими вид лент.

Дренажная призма в сочетании с ленточным дренажем сочетает преимущества обоих типов дренажа. При низких уровнях НБ работает ленточная часть, при высоких — призма.

Трубчатый горизонтальный дренаж имеет приемную часть, выполненную из перфорированных труб ($d \approx 0,2$ м), лежащих параллельно подошве откоса и обложенных обратным фильтром.

Неперфорированные трубы отводят воду от приемной части. Трубы из пористого бетона можно применять без обратных фильтров.

Обратные фильтры дренажей предназначены для предотвращения фильтрационных деформаций, которые могут иметь место при входе фильтрационного потока в дренаж, так как в месте входа градиенты напора возрастают. Их выполняют из грунтов или из искусственных материалов. Для подбора обратных фильтров пользуются характеристиками гранулометрического (зернового) состава защищаемого грунта и грунтов обратного фильтра по графикам В. С. Истоминой. Существует три типа обратных фильтров в зависимости от направления фильтрационного потока, и для каждого из этих типов имеется график, в котором область допускаемых значений грунта обратного фильтра находится ниже кривой графика. Если известны параметры защищаемого грунта и грунтов для обратного фильтра, то, используя кривые гранулометрического состава, можно проверить, попадает ли рассматриваемый грунт для обратного фильтра в область допускаемых значений рассматриваемого графика. Если нет, то кривую его гранулометрического состава перестраивают и решают вопрос о его сортировке (отделение непригодных мелких фракций для обеспечения необходимых d_{60} , d_{10} и d_{50}).

4.1.4. РАСЧЕТ И ПРОЕКТИРОВАНИЕ ПЛОТИН ИЗ ГРУНТОВЫХ МАТЕРИАЛОВ

Указанное включает в себя выполнение следующих операций:

- выбор створа и типа плотины;
- выбор и предварительное назначение основных конструктивных элементов и их размеров;
- определение превышения гребня плотины над расчетным уровнем в водохранилище;
- уточнение конструктивных элементов плотины и их размеров;
- фильтрационные расчеты;
- расчеты устойчивости и осадки плотины.

О выборе створа плотины было рассказано выше. Тип плотины принимают в зависимости от геологического строения и характера грунтов основания, наличия грунтов в районе строительства и расстояния от их карьеров до створа. Тип плотины и створ принимают на основе технико-экономического сравнения вариантов по нескольким створам и типам плотины. Основные размеры и конструктивные элементы предварительно назначают в зависимости от типа плотины, категории дороги, наличия строительных материалов для крепления откосов, покрытия гребня, дренажа и др.

Учет воздействия ветровых волн на откос плотины. Расчет ведут согласно СНиП 2.06.04—82. Для заданной скорости ветра v_w , длины разгона волны L и продолжительности действия ветра $t=21600$ с определяют по графику основные элементы волны (рис. 4.6, а): высоту h , длину λ , период T , на основе вычисления средних элементов $\bar{h}_d$, $\bar{\lambda}$ и $\bar{T}$ для глубоководной зоны (глубина воды в водохранилище $H > 0,5\lambda$) по безразмерным параметрам

$$a = gt/v_w; \quad b = gL/v_w^2,$$

где g — ускорение свободного падения.

По левой шкале графика (см. рис. 4.6) определяют величины $c = g\bar{h}/v_w^2$ и $e = q\bar{T}/v_w$ для параметров a и b . Из каждой пары соответствующих параметров берут меньшие значения их $c_{\min}$ и $e_{\min}$ и по ним вычисляют $\bar{h} = c_{\min}v_w^2/g$ и $\bar{T} = e_{\min}v_w/q$. Длину волны принимают $\lambda = gT^2/2\pi$.

Высота волны i %-ной обеспеченности принимают по графику (рис. 4.6, б).

Для расчета прочности и устойчивости креплений откоса из бетонных плит или каменной наброски обеспеченность высоты волны берут соответственно 1 и 2%.

Для мелководной зоны, то есть при $H \leq 0,5\lambda$, можно использовать график (рис. 4.6, в) для получения приближенных значений элементов волны.

Высоту наката для глубоководной зоны при обеспеченности i % вычисляют по зависимости

$$h_{run\ 1\%} = k_r k_p k_{sp} k_{run} k_\beta \bar{h}_{1\%},$$

где k_r , k_p , k_{sp} , k_{run} , k_β — коэффициенты, которые принимают по таблицам 1, 2 и приведенным ниже данным.

k_{run} определяют по графику, представленному на рисунке 4.7, в зависимости от коэффициента K_i , значения которого приведены ниже.

K_i	1,1	1	0,96	0,91	0,86	0,76	0,68
Обеспеченность по накату i , %	0,1	1	2	5	10	30	50

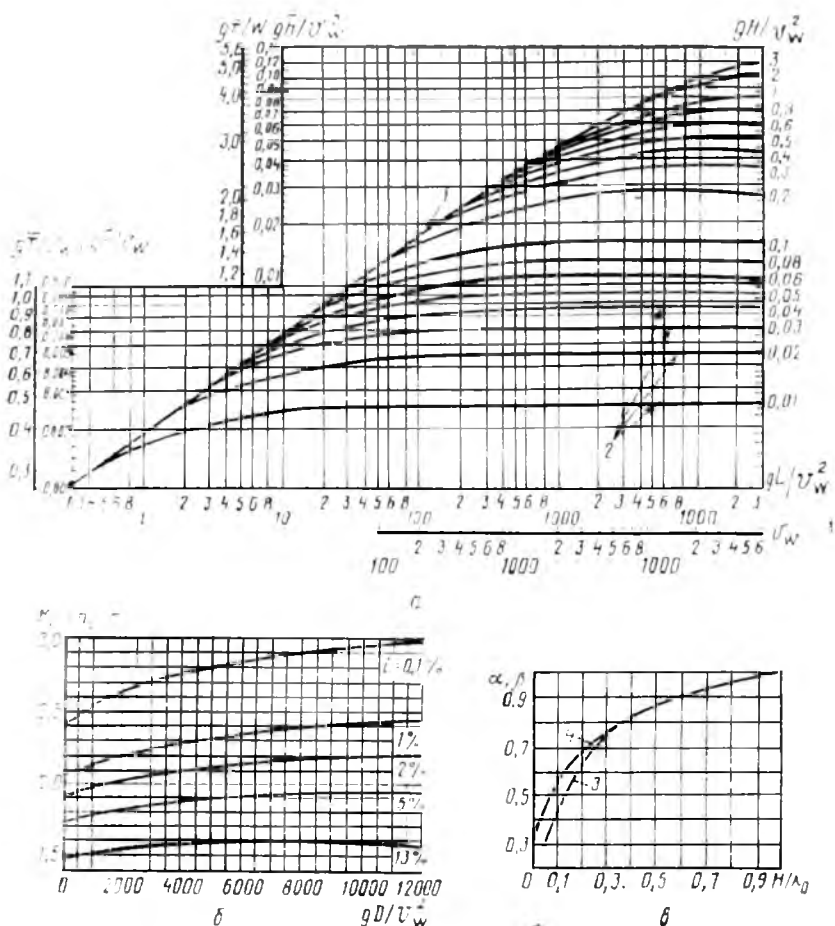


Рис. 4.6. Графики для определения элементов ветровых волн:

а — для получения h и T ; б — выбора коэффициента K ; в — учет элементов волн на мелководных участках; 1, 2 — огибающие соответственно для глубоководной и мелководной зон; 3 — кривая для α ; 4 — кривая для β

Коэффициент k_β зависит от угла β и составляет:

k_β	1	0,98	0,96	0,92	0,87	0,82	0,76
β , град	0	10	20	30	40	50	60

$h_{1\%}$ — высота волны 1%-ной обеспеченности.

Высоту (м) ветрового потока определяют по формуле

$$\Delta h = 2 \cdot 10^{-6} (v_w^2 L / g H) \cos \beta,$$

где v_w — скорость ветра, м/с; L — длина разгона волны, м; g — ускорение свободного падения, м/с²; H — глубина воды, м; β — угол между продольной осью водоема и направлением ветра.

1. Значение коэффициентов k_r и k_p в зависимости от конструкции крепления откосов

Крепление откоса	Относительная шероховатость r/h 1%	k_r	k_p
Бетонные (железобетонные) плиты	—	1	0,9
Гравийно-галечниковое, каменное или бетонные (железобетонные) блоки	<0,002 0,005...0,01 0,02 0,05 0,1 >0,2	1 0,95 0,9 0,8 0,75 0,7	0,9 0,85 0,8 0,7 0,6 0,5

Примечание. Характерный размер шероховатости r принимают равным среднему диаметру зерен материала крепления откоса или среднему размеру бетонных (железобетонных) блоков.

2. Значение коэффициента k_{sp} в зависимости от угла наклона откоса к горизонту φ

ctg φ	Значение k_{sp} при скорости ветра		ctg φ	Значение k_{sp} при скорости ветра	
	20 м/с и более	10 м/с и менее		20 м/с и более	10 м/с и менее
0,4	1,3	1,1	3...5	1,5	1,1
0,4...2	1,4	1,1	>5	1,6	1,2

Затем по формуле (4.1) принимают отметку гребня, то есть становится известной высота плотины в русловой части. Имея отметку гребня плотины и дна реки, можно найти высоту плотины. По полученной высоте уточняют все конструктивные элементы плотины.

Фильтрационный расчет. Он заключается в определении положения депрессионной кривой в теле плотины, проверке градиентов напора фильтрационного потока и вычислении фильтрационного расхода по сечениям, что позволяет найти потери воды из водохранилища через тело плотины, основание и в обход плотины.

Расчеты фильтрации проводят с учетом следующих предположений: движение фильтрационного потока рассматривают плоским, грунт тела плотины принимают однородно-изотропным, положение кривой депрессии не зависит от типа грунта, а является функцией геометрических размеров профиля плотины и уровней воды ВБ и НБ, линию границы водоупора принимают

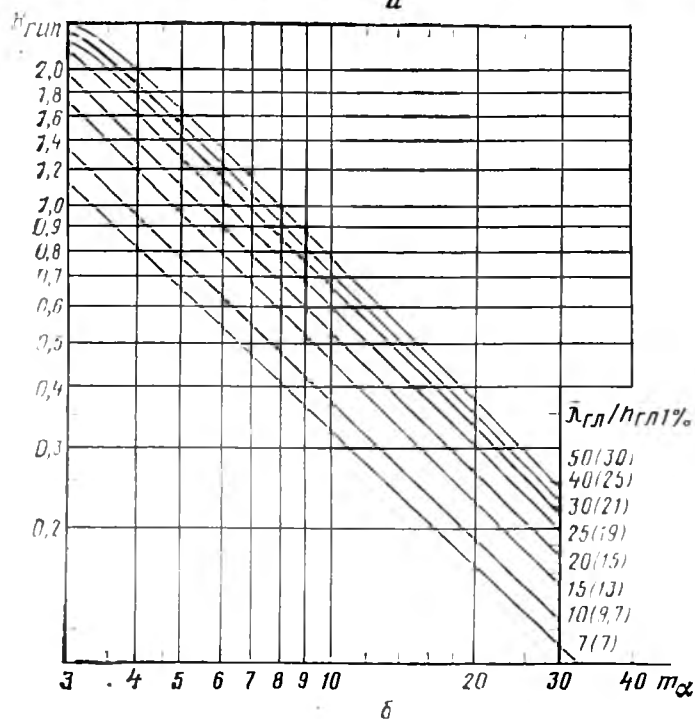
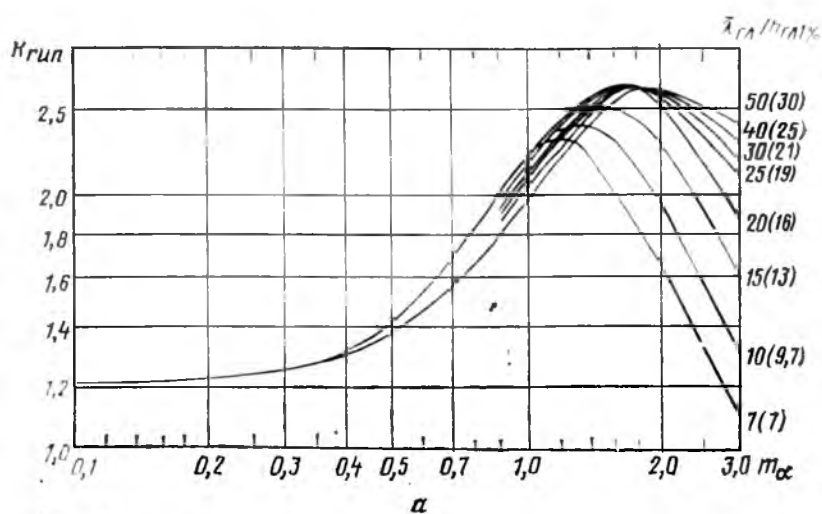


Рис. 4.7. Графики коэффициентов $k_{гуп}$ в зависимости от $\bar{\lambda}_{гд}/h_{гд} 1\%$

ют горизонтальной. Рассматривают вначале плотины на непроницаемом основании.

Используют два основных аналитических метода фильтрационных расчетов: гидромеханический и гидравлический. Первый из них ввиду сложности в практике проектирования не получил широкого распространения. Гидравлический метод, базирующийся на ряде допущений (приведенных выше), прост, не требует сложных математических преобразований и получил широкое распространение.

Экспериментальные методы (и среди них особенно метод ЭГДА) дают наиболее полную картину движения фильтрационного потока, использование этих методов обязательно при расчетах и проектировании плотин I и II классов. При соответствующем обосновании экспериментальные методы могут быть применены и для плотин других классов.

При фильтрационных расчетах используют закон Дарси и зависимость Дюпюи $v = Ki$; $q = Sv = SKi$: для фильтрации через тело плотины

$$q = K(h_1^2 - h_2^2)/2l,$$

где q — удельный фильтрационный расход, м³/с; K — коэффициент фильтрации, м/с; h_1, h_2 — глубины фильтрационного потока для двух смежных сечений относительно некоторой произвольно принятой плоскости сравнения, м; l — расстояние между рассматриваемыми сечениями, м.

Широко используют также гидравлический метод эквивалентного профиля. Суть его заключается в том, что реальный поперечный профиль плотины заменяется на эквивалентный в фильтрационном отношении профиль с вертикальным верховым откосом. Параметры фильтрационного потока, вычисленные по этому методу, весьма близки аналогичным параметрам, полученным для реального профиля плотины.

Фильтрация в однородных плотинах на непроницаемом основании. Область фильтрации, по Н. Н. Павловскому, делят на три характерных участка с различными значениями градиентов напора: I — верховой клин; II — средняя часть; III — низовой клин (рис. 4.8), для каждого из которых получены уравнения для фильтрационного расхода и построения депрессионной кривой.

В методе эквивалентного профиля верховой клин исключен за счет удлинения средней части на ΔL , при переходе к реальному профилю депрессионная кривая от вертикали, проходящей через границу верхового откоса с гребнем, плавно соединяется с откосом (реальным), примыкая к нему под прямым углом.

Положение раздельного сечения находят по зависимости Г. К. Михайлова

$$\Delta L = H_u m_1 / (2m_1 + 1),$$

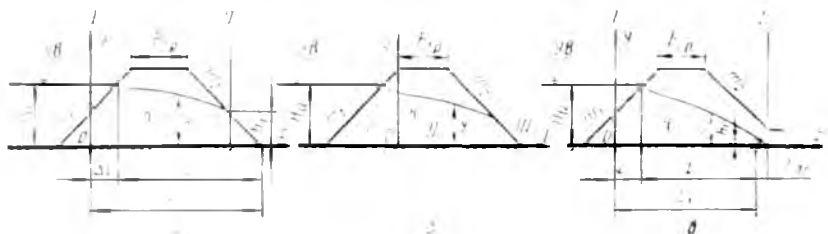


Рис. 4.8. Схема к расчету однородной плотины на непроницаемом основании: I, II — входное и выходное сечения фильтрационного потока; $l_{др}$ — величина захода депрессионной кривой в дренаж

где ΔL — расстояние от разделного сечения (границы эквивалентного профиля) до уреза воды, м; H_u — глубина перед плотиной, м; m_1 — заложение верхового откоса.

Основные расчетные зависимости для *однородной плотины без дренажа* (рис. 4.8) с учетом приведенных выше предпосылок могут быть записаны в таком виде:

для удельного расхода фильтрационного потока

$$q/K = (H_u^2 - h_1^2)/2(L_1 - h_1 m_2), \quad (4.2)$$

где H_u — глубина воды в верхнем бьефе, м; h_1 — глубина над входом в дренаж, м;

$$h_1 = L_1/m_2 - \sqrt{(L_1/m_2)^2 - H_u^2}, \quad (4.3)$$

где L_1 — длина депрессионной кривой, м; m_2 — заложение низового откоса;

$$L_1 = L + \Delta L; \quad (4.4)$$

для построения депрессионной кривой

$$y^2 = H_u^2 - 2qx/K. \quad (4.5)$$

Зависимости для удельного расхода и построения депрессионной кривой применительно к *однородной плотине с дренажем* можно представить в виде:

для удельного расхода фильтрационного потока

$$q/K = (H_u^2 - h_1^2)/2L_1;$$

для построения депрессионной кривой

$$y^2 = (H_u - h_1)^2 - 2qx/K.$$

Плотина с ядром. При расчете такой плотины применяют метод приведения ее к однородной, то есть проводят эквивалентную замену грунта ядра грунтом тела плотины. Вместо имеющегося ядра толщиной $b_{ср} = (b_1 + b_2)/2$ (b_1 ; b_2 — ши-

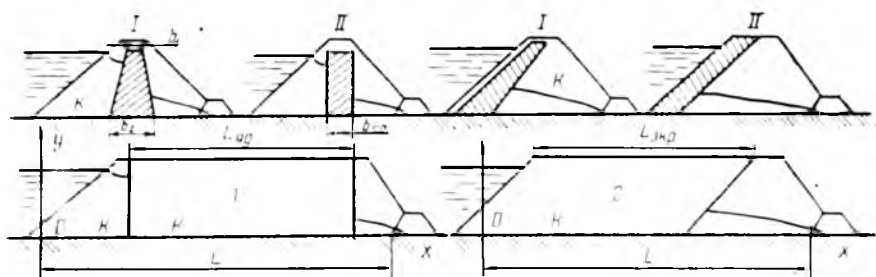


Рис. 4.9. Схемы к расчету грунтовой плотины с ядром (I) и экраном (II) способом эквивалентной замены:

1 — эквивалентное ядро; 2 — эквивалентный экран

рина ядра сверху и понизу) (рис. 4.9) с коэффициентом фильтрации K_1 используют грунт тела плотины. Ширина этой приведенной части должна быть эквивалентной ядру в фильтрационном отношении.

На основе использования метода виртуальных длин она будет

$$L' = b_{cp} K / K_1.$$

С учетом собственно тела плотины получается однородная плотина (см. рис. 4.9) и фильтрационный расчет ведут, как для однородной плотины. Депрессионную кривую перестраивают на реальный профиль плотины.

Плотины с экраном (см. рис. 4.9). Рассчитывают ее аналогично плотинам с ядром. Имеющийся профиль с экраном приводят к схеме однородной плотины, то есть среднюю толщину экрана $b_{cp} = (b_1 + b_2) / 2$ заменяют грунтом тела плотины $I' = b_{cp} K \sin \theta / K_1$ и рассчитывают как однородную.

Фильтрационные расчеты плотины на водонепроницаемом основании. Расход через тело и основание однородной плотины с дренажем (рис. 4.10) определяют по зависимости

$$q = K \frac{H_1^2}{2L_1} + K_0 T \frac{H_1}{L_1 + 0,4T},$$

где K, K_0 — коэффициенты фильтрации грунтов тела и основания плотины, м/с; T — мощность проницаемого слоя основания, м.

Кривую депрессии строят так же, как для однородной плотины на непроницаемом основании.

Для плотин с экраном и понуром принимают допущение — экран и понур водонепроницаемы, что не является большой по-

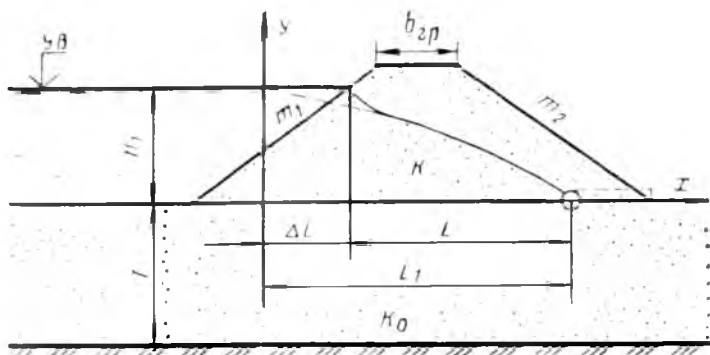


Рис. 4.10. Схема для фильтрационного расчета грунтовой плотины на проницаемом основании:

T — мощность толщи проницаемого грунта

грешностью. Это позволяет получить выражение для расхода фильтрационного потока (рис. 4.11):

$$q = K_0 T \frac{H_1 - h_1}{1,1 (L_{\text{п}} + m_1 h_3)} = \frac{h_3 - h_0}{L} \left(K_0 T + K \frac{h_3 - h_1}{2} \right),$$

где h_3 — глубина воды в зоне выклинивания, м; $L_{\text{п}}$ — длина понура, м; m_1 — заложение верхового откоса; h_1 — глубина над входом в дренаж (или глубина в НБ).

В уравнении неизвестно h_3 и L , зависящая от h_3 , поэтому их решают совместно: задаются h_3 , получают L и подставляют в обе зависимости. Когда второе равенство и третье будут одинаковы по величине, то h_3 — искомое (соответственно и L).

Депрессионную кривую строят по зависимости Дюпюи. Если начало координат принять в месте входа кривой депрессии в

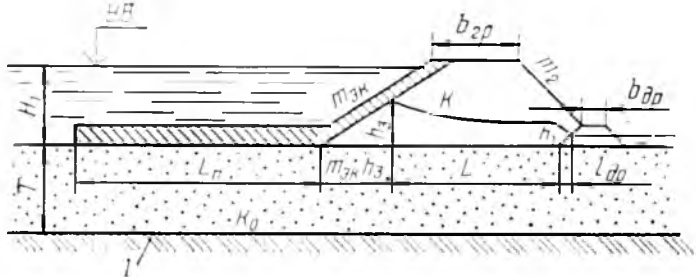


Рис. 4.11. Схема фильтрационного расчета плотины с экраном и понуrom:

$h_{\text{п}}$ — длина понура; $m_{\text{эк}}$ — заложение экрана; h_3 — ордината депрессионной кривой в месте выклинивания за экраном

дренаж, то для нее можно записать зависимость

$$y^2 = (h_3 - h_0)^2 x/L,$$

где x — абсциссы кривой депрессии; y — ее ординаты.

Расчет устойчивости откосов грунтовых плотин. С целью предотвращения или недопущения потери устойчивости откоса плотины, которая возможна при некоторых условиях в форме оползания грунтового массива по какой-то криволинейной поверхности с захватом части или всего откоса и части основания, устойчивость откоса проверяют расчетом. Разработано несколько методов расчета устойчивости низового откоса, устойчивость верхового откоса можно не проверять, если обеспечена устойчивость низового.

Расчеты устойчивости низового откоса обычно базируются на том, что задаются характером поверхности обрушения.

Задача сводится к отысканию минимального коэффициента устойчивости, который должен быть не менее нормативного, установленного СНиП.

Один из распространенных методов — это расчет устойчивости откосов по круглоцилиндрическим поверхностям скольжения. В нем принято, что обрушение (скольжение) будет происходить по поверхности кругового цилиндра, относительно некоторого центра вращения, расположенного выше гребня плотины. Принято также, что обрушивающаяся часть плотины скользит по поверхности обрушения, не рассыпаясь, как бы замерзшая. Это позволяет оценивать устойчивость откоса коэффициентом запаса γ_n , являющимся отношением суммы моментов M удерживающих сил к сумме моментов сил M_Q , сдвигающих его относительно центра вращения 0:

$$\gamma_n \geq M/M_Q. \quad (4.6)$$

В состав призмы обрушения могут входить грунты с различными характеристиками, поэтому весь оползающий массив разбивают вертикальными линиями на отдельные элементы — отсеки и рассматривают устойчивость каждого. Чаше всего ширину отсека принимают $b=0,1r$ (где r — радиус поверхности обрушения), что упрощает расчеты. При расчете принято допущение о том, что взаимодействие между отсеками отсутствует, то есть их, как и всю область обрушения, рассматривают как недеформируемые; сдвигающим силам по поверхности обрушения противодействуют силы трения и сцепления.

γ_n определяют как отношение сумм моментов всех отсеков (рис. 4.12):

$$\gamma_n = (N \operatorname{tg} \varphi r + c l r) / (Q r + \Phi_1 r_1),$$

где N — нормальная сила, действующая на отсек грунта шириной b , кН; φ —

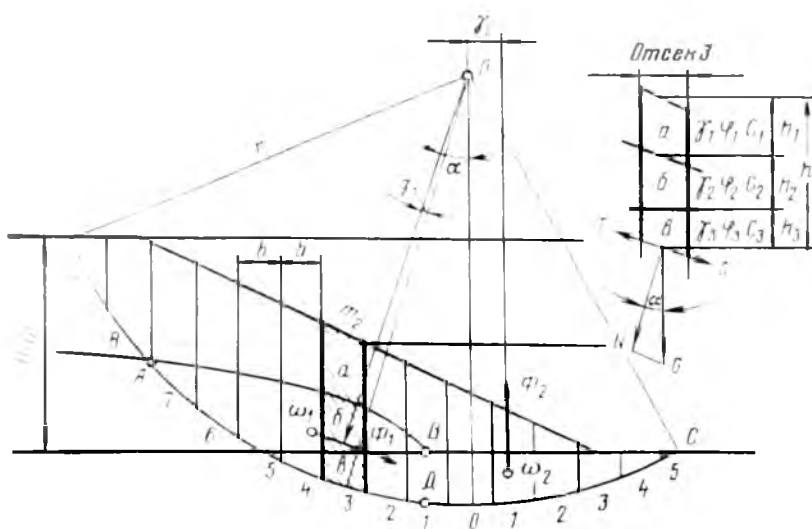


Рис. 4.12. Схема к расчету устойчивости низового откоса методом круглоцилиндрических поверхностей обрушения

угол внутреннего трения, град; r — радиус поверхности кривой обрушения, м; c — удельное сцепление, кПа; l — длина поверхности действия силы сцепления, м; Q — масса отсека, кг, $Q = bh\gamma$ (b — ширина отсека грунта, м; h — высота отсека грунта, м; γ — удельный вес грунта, т/м³); Φ_1 — фильтрационная сила, учитывающая дополнительную сдвигающую силу, которая возникает при движении фильтрационного потока в теле плотины, $\Phi_1 = W i$ (где W — площадь, ограниченная сверху депрессионной поверхностью, а снизу — кривой скольжения, м²; i — градиент напора фильтрационного потока, который можно определить по гидродинамической сетке движения или другими упрощенными способами). Расстояние от центра поверхности до центра тяжести этой площади — плечо этой силы; r_1 — радиус действия или плечо этой силы (см. рис. 4.12).

В развернутом виде

$$\tau_{np} = \frac{r\gamma_{np}b\sum h_{np} \cos \alpha \operatorname{tg} \varphi + r\sum c l}{r\gamma_{np}b\sum h_{np} \sin \alpha + \Phi_1 r_1}, \quad (4.7)$$

где γ_{np} — приведенный удельный вес грунта, обычно принимают его значение для грунта естественной влажности; h_{np} — приведенная высота отсека, учитывающая различные характеристики грунтов по высоте отсека, м;

$$h_{np} = h_1 + (h_2\gamma_2)/\gamma_{np} + (h_3\gamma_3)/\gamma_{np} + \dots, \quad (4.8)$$

где h_1, h_2, h_3 — высоты частей отсека с плотностью $\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3$; α — угол между вертикально, проходящей через центр O кривой скольжения, град; поскольку обычно принимают $b = 0,1R$, то $\sin \alpha_1 = 0,1$; $\sin \alpha_2 = 0,2$ и т. д., а $\cos \alpha_i = \sqrt{1 - \sin^2 \alpha_i}$, где i — порядковый номер отсека, считая от нулевого.

Обычно в формуле (4.6) проводят сокращение на r в числителе и знаменателе. Подсчет ведут в табличной форме.

Расчет устойчивости откоса сводится к отысканию минимального значения γ_n , то есть такого положения центра поверхности скольжения и значения радиуса этой кривой, при которых коэффициент запаса имел бы минимальное значение из всех возможных и был бы не менее нормативного.

Расчеты осадок грунтовых плотин. Осадка плотины представляет собой сумму осадок тела плотины и основания. Расчет осадки необходим для более точного определения объема земляных работ по плотине, учета строительной высоты сооружения и неравномерности осадки различных частей.

Осадки подсчитывают для характерных поперечных сечений плотины на нескольких вертикалях, выбираемых в неоднородных плотинах, и для отдельных элементов плотины (ядра, призмы и др.).

Осадка (уплотнение) тела плотины из песчаных грунтов в основном происходит в период строительства. Продолжительность осадки плотины из глинистых материалов зависит главным образом от фильтрационных свойств грунтов тела и возрастает с уменьшением коэффициента фильтрации.

Осадку (m) на любой расчетной вертикали за любой промежуток времени строительства и эксплуатации вычисляют по формуле

$$S = \sum_{i=1}^{i=k_{t_2}} h (l_1 - l_2) / (1 + l_1),$$

где k_{t_2} — порядковый номер элементарного слоя (осадку которого рассматривают), возведенного ко времени t_2 ; h — толщина этого рассматриваемого слоя, м; l_1 , l_2 — коэффициенты пористости, определяемые по компрессионной кривой в зависимости от сжимающих напряжений в скелете грунта (в основании рассматриваемого слоя), определяют как разность полного напряжения и порового давления в соответствующие моменты времени t_1 и t_2 .

4.2. КАМЕННО-НАБРОСНЫЕ И КАМЕННО-ЗЕМЛЯНЫЕ ПЛОТИНЫ

4.2.1. КАМЕННО-НАБРОСНЫЕ ПЛОТИНЫ

Каменно-набросными плотинами называют сооружения, тело которых насыпано из рваного или колотого камня, или булыжника в виде наброски (отсыпки). Так как основная масса плотины выполнена из рыхлого материала, они имеют повышенную водопроницаемость, для уменьшения которой сооружают различные противофильтрационные устройства. Плоти-

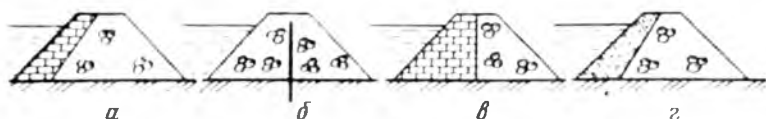


Рис. 4.13. Каменно-набросные плотины:

а — с экраном из негрунтовых материалов; б — с диафрагмой; в — полунабросная; г — с верховой бетонной стенкой

ны по конструкции поперечного профиля и противифльтрационного устройства делят (рис. 4.13) на плотины с экраном из негрунтовых материалов, с диафрагмой, полунабросные, с верховой бетонной стенкой. Чаще всего используют плотины с экраном из негрунтовых материалов и с диафрагмой. Конструкция плотин с бетонным экраном и зубом приведена на рисунке 4.14. Плотины в районах, где естественный камень широко распространен как строительный материал и разработка его в карьерах, как и транспортировка, не вызывает затруднений, возводят в основном на скальных основаниях.

Достоинства каменно-набросных плотин: возможность возведения на скальных и нескальных основаниях; отсутствие противодействия на тело плотины, так как высокая проницаемость его обеспечивает дренированность, возможность производства работ по отсыпке в любое время года; практически не ограниченная высота плотин; отсыпку камня в тело плотины можно осуществлять из полезных выемок, невысокие эксплуатационные затраты.

Недостатки каменно-набросных плотин: наброска из камня дает значительные осадки при уплотнении отсыпки (естественном или искусственном), водосбросные сооружения проектируют за пределами плотины.

Пригодность камня для тела плотины по устойчивости, долговечности при наименьших затратах оценивают на основе исследования его физико-механических показателей: гранулометрического состава, плотности, пористости в отсыпке, морозостойкости, угла внутреннего трения, размягчения при увлажнении.

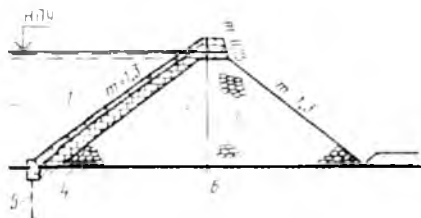


Рис. 4.14. Каменно-набросная плотина с экраном и бетонным зубом:

1 — бетонный экран; 2 — сухая кладка; 3 — каменная наброска; 4 — зуб из бетона; 5 — цементационная завеса; 6 — скальное основание

Из карьера или полезной выемки камень без сортировки отсыпают в тело плотины пионерным способом (под откос) ярусами высотой 10...20 м. При отсыпке с послойной укладкой (уплотнением) крупность камня не должна быть больше половины толщины отсыпаемого слоя. Уплотнение можно осуществлять струей воды (из гидромонитора), использованием грунтоуплотняющих машин и заполнением пространств между камнями песком или песчано-гравийной смесью.

Для плотин I...II классов высотой свыше 50 м показатели камня проверяют исследованиями на опытных насыпях, а при высоте плотины более 100 м такие исследования обязательны.

Элементы конструкций каменно-набросных плотин и противофильтрационные устройства. Гребень в этих плотинах, как и грунтовых, используют как дорогу, при наличии проезда через плотину ширину гребня определяют категорией дороги. Отметку гребня находят так же, как и для грунтовых плотин. Заложение низового откоса принимают $m_1 = 1,2 \dots 1,6$, что соответствует углу естественного откоса, то есть $32 \dots 40^\circ$. Верховой откос может иметь такое же заложение, как и низовой. При укладке экрана на подэкрановую сухую кладку (или из плоских постелистых камней с перевязкой швов, или из крупнообломочных грунтов) этот угол может быть уменьшен до $20 \dots 30^\circ$. Толщина подэкрановой кладки сверху не менее 1 м, внизу 5...8% высоты плотины. Экраны выполняют из железобетона, бетона, асфальтобетона, дерева, металла и полимерных пленок. Железобетонные экраны бывают полужесткие однослойные и гибкие многослойные скользящие, разрезанные вертикальными и горизонтальными швами. Плиты покрыты по поверхности скольжения горячим битумом, они связаны анкерами с подэкрановой кладкой. Асфальтобетонные экраны делают без швов. Это монолитное покрытие из одного или нескольких слоев асфальтобетона толщиной от 8...10 до 30 см.

Экраны из синтетических пленок постепенно приобретают все большее распространение.

Металлические и деревянные экраны применяют относительно редко, хотя они и имеют некоторые достоинства (быстро возводятся, достаточно гибки и легко следуют за осадкой тела плотины, водонепроницаемы).

Сопряжение экрана с основанием (зубом или завесой) должно обеспечить надежность соединения при осадке плотины.

4.2.2. КАМЕННО-ЗЕМЛЯНЫЕ ПЛОТИНЫ

В каменно-земляных плотинах противофильтрационные устройства (ядро, экран) выполняют из грунтовых материалов, а само тело — из каменной наброски. Материалом для ядра

или экрана служат маловодопроницаемые грунты (глина, суглинок, трамбованная смесь — глинобетон), торф, реже асфальтобетон и полимерные пленки. Плотины возводят, как и каменно-набросные, на скальных и нескальных основаниях. Конструкция гребня такая же, как и в каменно-набросных и грунтовых плотинах.

Каменно-земляные плотины с ядром. В этих плотинах ядро (вертикальное или слабонаклоненное) делают из глин, суглинков, глинобетона, а в плотинах с грунтовой профильтративной призмой — из супеси и мелкопесчаного грунта; можно применять также асфальтобетон и полимерные пленки. Ядро из грунта (рис. 4.15) укладывают в форме трапеции, толщиной поверху по условиям производства работ не менее 3 м, понизу — согласно расчету по допускаемому градиенту. Ось вертикального ядра может совпадать с осью гребня плотины, возможно некоторое смещение его в сторону ВБ. К грунтовому ядру примыкают с обеих сторон переходные зоны. Со стороны ВБ называют переходную зону — предупреждают концентрацию напряжений и самозалечивание в случае появления тре-

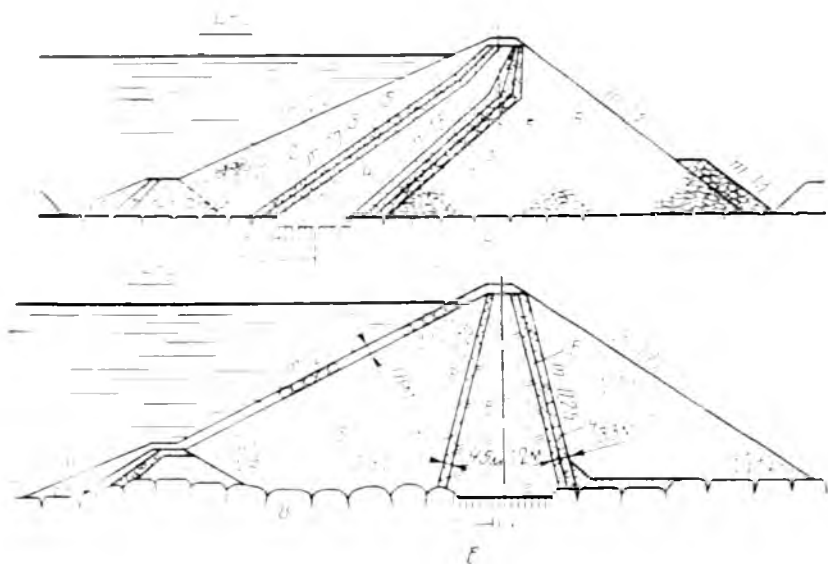


Рис. 4.15. Поперечные профили каменно-земляных плотин:

а — плотина с экраном: 1 — верховая перемычка; 2 — пригрузка карьерным камнем; 3, 5, 7 — слои обратного фильтра; 4 — грунтовой экран; 6 — каменная наброска; 8 — скала-основание; 9 — завеса противифильтративная; 10 — цементация по площади; б — плотина с ядром: 1 — верховая перемычка; 2 — крепление верхового откоса из крупного камня; 3 — каменная наброска; 4, 6 — слои обратного фильтра; 5 — грунтовое ядро; 7 — завеса инъекционная; 8 — скала-основание

щин в ядре, а также проникание мелких частиц грунта в поры каменной наброски. С низовой стороны переходные зоны обеспечивают фильтрационную прочность грунта ядра, то есть защищают его от фильтрационных деформаций в нем. Фракции слоев для переходных зон подбирают по методике, рекомендуемой для обратных фильтров (см. 4.1.3).

Каменно-земляные плотины с экраном. Как и в плотинах с ядром, экран с телом плотины сопрягают посредством переходных зон (см. рис. 4.15, а), которые могут быть *однослойные* и *многослойные*. Однослойные переходные зоны предпочтительнее, так как экономичнее. Ширина каждой зоны по горизонтали — не менее 3,5 м, а при широком гребне для обеспечения встречной езды по укладке и укатке может быть 4...5 м. С верховой стороны экрана поверх переходной зоны должна быть пригрузка в виде защитного слоя из каменной мелочи или песчано-гравелистого грунта или каменной наброски. Минимальную толщину слоя пригрузки у гребня принимают с учетом глубины промерзания и условий производства работ по ее укладке, книзу толщина ее увеличивается. Поверх пригрузки укладывают крепление верхового откоса в виде каменной наброски.

Заложение верхового откоса каменно-земляной плотины с экраном несколько положе, чем каменно-набросной, и составляет 1:2 до 1:4 и зависит от сдвиговых характеристик грунтов экрана, переходных зон и пригрузки.

Выше указывалось, что в качестве противофильтрационных материалов экрана могут быть использованы полимерные пленки, их укладывают на подстилающий слой из грунта (супеси, суглинка и песка) толщиной 0,3...0,4 м, сверху пленку прикрывают защитным слоем такого же грунта, предусматривая компенсаторное устройство для предотвращения ее разрыва.

При выборе типа плотины — с ядром или экраном, кроме технико-экономического сравнения вариантов необходимо учитывать, что плотина с ядром имеет более обжатый профиль по сравнению с плотиной с экраном; для сейсмичных районов предпочтительнее плотина с ядром; условия работы ядра — его устойчивость выше, а возможность оползания ниже.

Преимущества плотины с экраном: экран можно укладывать независимо от тела плотины, если тело плотины сооружают быстрее; в каменно-земляных плотинах с экраном большая часть поперечного профиля сухая, то есть свободна от воды, что облегчает ремонтные работы экрана — необходимо снять только пригрузку и переходный слой.

4.3. НАМЫВНЫЕ ПЛОТИНЫ

Грунтовые плотины, в которых доставляют и укладывают грунт в тело плотины средствами гидромеханизации, называют намывными. Преимущества намывных плотин: полная механизация всего процесса по разработке, транспортировке и укладке грунта, возможность выполнения работ при любых погодных условиях и некоторое сокращение затрат по удельным показателям.

Возведение таких плотин возможно, если имеется источник воды, карьеры грунта, отвечающего условиям укладки в тело плотины, и соответствующий парк машин и механизмов.

Для намыва плотин используют связные и несвязные грунты.

Плотины в зависимости от материала и способов намыва подразделяют на три основных типа.

Однородные, для которых пригодны песчаные грунты с небольшим коэффициентом неоднородности (3...4), супесчаные и суглинистые (лёссовые) грунты; поперечный профиль их формируют или принудительно с помощью дамб, или путем растекания массы, со стороны одного или обоих откосов (рис. 4.16).

Неоднородные из гравийных и щебенистых грунтов, в которых ядро формируется из глинистого, супесчаного или мелкопесчаного грунта, поперечный профиль их формируется принудительно, намыв ведется по двусторонней схеме с прудком — отстойником посередине.

Неоднородные из песчаных грунтов с образованием мелкопесчаной зоны в средней части поперечного профиля, который формируется принудительно. Намыв ведут по двусторонней схеме.

Грунты для тела плотины, как видно из предыдущего, можно использовать самые различные. Предварительно карьерные грунты оценивают по графику гранулометрического состава, который приведен на рисунке 4.17. Песчаные грунты 1-й группы используют для однородных плотин; песчаные и гравийные 2-й группы пригодны для плотин с мелкопесчаным ядром или мелкопесчаной центральной зоной. Супеси, суглинки, гравийно-галечные грунты (3, 4 и 5-й групп) используют для намыва плотины при специальном технико-экономическом обосновании; супеси и суглинки при этом пригодны для однородных плотин (или ядра для неоднородных), суглинки и глины — только для ядра, гравийные грунты — для намыва упорных призм.

Надводный и подводный намыв. Первый ведут на пойменных участках при отсутствии воды, при этом намывают и однородные и неоднородные плотины. Подводный намыв предна-

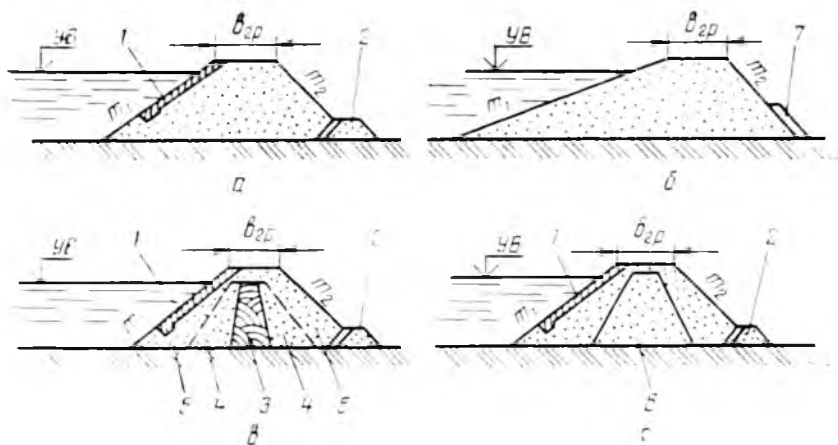


Рис. 4 16. Типы намывных плотин:

а и *б* — однородные; *в*, *г* — неоднородные; *1* — крепление верхнего откоса; *2* — дренаж; *3* — ядро; *4*, *5*, *6* — зоны плотины соответственно промежуточная, боковая и центральная мелкопесчаная; *7* — наклонный дренаж

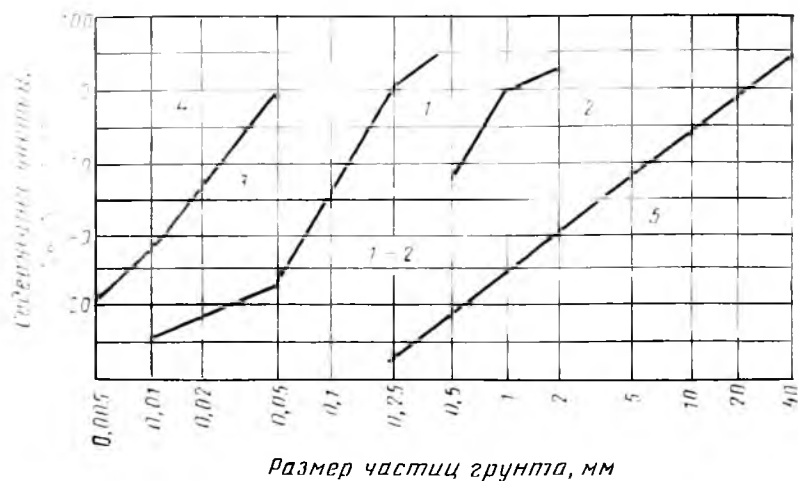


Рис. 4 17. Грунты для намыва плотин и границы их использования:

1, *2* — для песчаных и песчано-гравийных грунтов; *3*, *4*, *5* — зоны соответственно супесей, суглинков и гравелистых грунтов

значен для русловой части плотины, здесь формируются профили однородных плотин с заложением откоса, соответствующего углу естественного откоса в воде.

Поперечный профиль намывных плотин. Он имеет такое же очертание, как и для насыпных плотин с искусственным уплотнением. При принудительном принципе формирования профиля заложение верхового откоса получается такое же, как и у насыпных. Если верховой откос получается свободным растеканием, что характерно при намыве несвязного грунта, то откос формируют очень пологим с заложением $0,01 \dots 0,07$ в зависимости от характера грунта и интенсивности намыва. Опытный намыв позволяет получить заложения свободноформируемого откоса.

Основные особенности намыва плотин. Существует два способа намыва — эстакадный и безэстакадный. При первом из упомянутых способов вдоль оси плотины устанавливают эстакаду в один или два ряда, на которую укладывают напорные трубопроводы или лотки, подающие гидросмесь. От лотков или трубопроводов отходят отводы, из которых выпускают гидросмесь. После намыва слоя грунта, близкого к высоте эстакады, ее наращивают. Применяют этот способ редко.

При втором способе намыва трубопроводы укладывают или на намытый грунт, или на насыпные дамбы обвалования, наращивая или снимая трубы по длине при переходе от одной карты намыва к другой. Способы подачи гидросмеси на карту намыва принимают по одной из трех схем: односторонней, двусторонней и мозаичной.

При односторонней схеме намыва низовой откос формируют принудительно с помощью дамб, а верховой — или принудительным, или свободным.

При двустороннем способе намыва используют грунты, содержащие глинистые частицы. Гидросмесь выпускают из трубопроводов (или лотков), уложенных на грунтовые дамбы обвалования, формирующие откосы; в середине профиля образуется прудок-отстойник, где осаждаются глинистые частицы, образующие ядро. Осветленная вода из прудка удаляется через колодцы за пределы плотины.

При мозаичной схеме намыва применяют однородные песчаные грунты. В этом случае гидросмесь выпускают по всей ширине плотины из нескольких трубопроводов; прудков-отстойников не образуется. Способ практикуется часто при намыве в воду.

Плотины, возводимые отсыпкой в воду. Системой валиков (дамбочек) создают прудки, а затем в них отсыпают грунт, уплотняя автосамосвалами, доставляющими его. При отсыпке в воду можно использовать все виды грунтов, но лучше легко

размываемые, например лёссовые. Для противофильтрационных устройств применяют маловодопроницаемые грунты. Показатели грунтов, используемых для укладки в сооружение, должны соответствовать требуемым нормам.

Это способ возведения очень удобен, так как уплотнение грунта происходит под влиянием собственного веса, а также транспортом, доставляющим грунт к месту укладки; длительность строительного сезона может быть несколько увеличена; монолитность грунта тела плотины, противофильтрационных устройств (ядра, экрана, понура) обеспечена. Размеры карт (прудов) зависят от производительности оборудования и общего объема отсыпки грунта. Для песчано-гравелистых грунтов толщина слоя отсыпки составляет 4...10 м; для суглинков — 1...2, для тяжелых суглинков — не более 1 м. При переходе от одного слоя к другому оси валиков смещают. Уровень воды в прудке поддерживают постоянным, излишки воды сбрасывают в соседний прудок.

4.4. ПЛОТИНЫ ПРОЧИХ ТИПОВ ИЗ ГРУНТОВ, ДЕРЕВА, ТКАНЕЙ

Плотины, возводимые направленным взрывом. При размещении ВВ (взрывчатых веществ) в зарядные камеры в штольнях или штреках внутри одного из береговых склонов с помощью взрыва можно переместить массу породы на необходимое (расчетное) расстояние в заданном направлении, при этом может быть обеспечена ее укладка по намеченному контуру. В гидротехническом строительстве направленные взрывы используют для возведения плотин, дамб, перемычек, упорных призм в каменно-набросных плотинах, каналов.

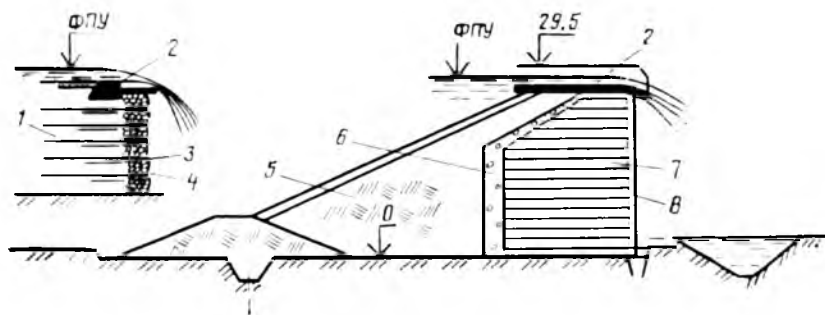


Рис. 4.18. Схема армированной плотины Эстель (Франция):

1 — арматура, приваренная к закладной части блока; 2 — водослив; 3 — вариант вертикальной стенки из синтетических мешков с наполнителем; 4 — камень; 5 — экран из малопроницаемого грунта; 6 — дренаж; 7 — зона армирования; 8 — вертикальная стенка

Достоинства возведения сооружений направленным взрывом: возведение сооружения или его основной части в короткое время, использование минимального числа механизмов и рабочих, выполнение работ в любое время года, возможность применения этого способа, где другие трудноосуществимы, использование любых пород и каменных грунтов, перекрытия русла не требуется, более низкая стоимость, экономичность.

Недостатки этого способа: увеличение объема работ по сравнению с другими способами, необходимость горных выработок для размещения зарядов ВВ, сложность выполнения противифльтрационных устройств.

Размещать заряды ВВ при сооружении плотин направленным взрывом можно и на обоих берегах. Расход зарядов ВВ и расстояние между ними определяют расчетом.

Плотины на вечной мерзлоте. Площадь, занятая вечномерзлыми грунтами, в СССР значительна, поэтому строительство грунтовых плотин в этих районах стало актуальным. В этой зоне применяют плотины трех типов: *талые* с ядром или экраном, возводимые из непросадочных и непучинистых грунтов (тела плотины и основания); *мерзлые*, при укладке которых промораживают все поперечное сечение плотины, и *мерзлые, в которых сначала укладывают ядро*, промораживают его и в таком состоянии поддерживают его весь период строительства и эксплуатации.

Талые плотины проектируют и возводят на основании действующих нормативов, относящихся к районам умеренного климата. Часто это плотины из каменной наброски с ядром или экраном из водонепроницаемого грунта (иногда применяют пленки) на основании из связных или несвязных непросадочных и непучинистых грунтов или на скальном основании.

Мерзлые плотины в своем поперечном профиле имеют зоны промороженного грунта, сомкнувшиеся с вечномерзлым грунтом основания. Бывают плотины, у которых при строительстве промораживают весь поперечный профиль. В процессе эксплуатации часть сечения и основания таких плотин оттаивает после заполнения водохранилища, границы зоны оттаивания определяют теплотехническим расчетом.

Для второго типа мерзлой плотины грунтовое ядро, выполненное из талого грунта, промораживают системой охлаждения, которая состоит из морозильных колонок, в которых циркулирует охлаждающая смесь в виде жидкости (рассола) или воздуха. Промороженное состояние поддерживают весь период эксплуатации.

Плотины из армированного грунта. Эти плотины строят как глухими (непереливными), так и водосливными (рис. 4.18). Особенность конструкции такой плотины — укладка в грунт

низового откоса арматуры в виде системы полос из металла (оцинкованная или нержавеющая сталь, алюминий и др.) или из специально подготовленной ткани (синтетическое волокно в пластмассовой оболочке). Арматуру укладывают горизонтально, длина полос около $0,8H$ (где H — глубина укладки). Низовая часть вместо откоса обычной грунтовой плотины представляет собою вертикальную стенку, выполненную из бетонных или железобетонных блоков (прямоугольных или крестообразных) или мешков из синтетического материала, заполненных булыжным камнем. Для обеспечения водонепроницаемости по верховому откосу отсыплют грунт (суглинок или глину) или делают экран из асфальтобетона либо из нетканых материалов (геотекстиля, пропитанного битумом). Использование арматуры повышает прочность грунтового массива, сцепление достигает $1...2 \text{ Н/см}^2$. Армированный грунт способен воспринимать значительные деформации, что существенно при использовании таких плотин в сейсмичных районах.

Плотины из армированного грунта по сравнению с обычными из грунтовых материалов на $10...20\%$ экономичнее, с увеличением высоты экономичность повышается.

Грунтовые водосливные плотины. Обеспечение пропуска паводковых расходов через плотину снижает стоимость гидрозлов. Водосливная плотина Н. П. Пузыревского, построенная в 1926 г., пропускала часть паводкового расхода через тело, то есть как фильтрационный поток через наброску, остальную часть — путем перелива через гребень и откос (рис. 4.19).

Несколько усовершенствованный тип плотины высотой $7...10$ м был разработан Н. Н. Беляшевским. Каменная наброска была прикрыта со стороны низового откоса бетонной армированной плитой, опирающейся на массивный бетонный блок у основания низового откоса и соединенной с массивным бетонным оголовком на гребне (см. рис 4 20).

Грунтовая плотина, у которой низовой откос покрыт клиновидными перфорированными плитами, уложенными на обратном фильтре, предложена П. И. Гордненко (см. рис. 4.20). Имеются примеры крепления низового откоса водосливной плотины габионами.

Стланевые плотины. Это простейшие по конструкции водосливные плотины, выполненные из кладки свежесрубленных деревьев с неочищенной от листвы кроной (рис. 4.20). Деревья укладывают рядами, каждый слой (ряд) пригружают баластом; верхний слой из водонепроницаемого грунта уложен по верховому откосу в виде экрана, переходящего в понур. Для плотин используют некондиционный материал — бревна и жерди. Конструкция плотин проста, экономична. Такие плотины можно возводить высотой до $5...6$ м.

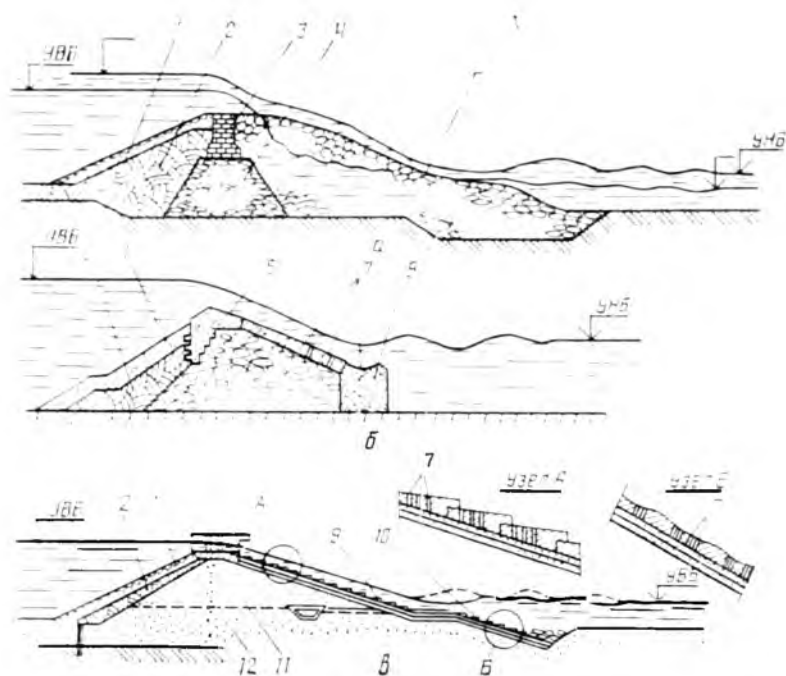


Рис. 4.19. Водосливные грунтовые плотины:

а — И. П. Пузыревского; б — Н. Н. Беляшевского; в — П. И. Гордиенко; 1 — крепление верхнего откоса; 2 — связанный грунт водонепроницаемый (экран); 3 — переливная стенка из каменной кладки; 4 — призма крепления из каменной кладки; 5 — каменная наброска; 6 — бетонный оголовок гребня; 7 — дренажные отверстия; 8 — низовой упорный шток; 9 — крепление ступенчатое из клиновидных перфорированных плит; 10 — чешуячатая рисберма; 11 — тело плотины (песок или супесь); 12 — основание

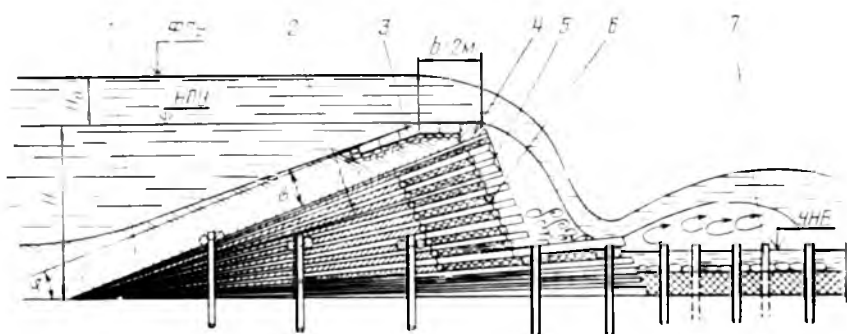


Рис. 4.20. Стланевая водосливная плотина:

1 — экран; 2 — стланевая кладка из дренажных слоев с загрузкой; 3 — бетонные плиты или камень; 4 — шапочный брус; 5 — обшивка из пластин; 6 — лежни из бревен; 7 — габионная кладка

Деревянные плотины. Это плотины, в которых основную нагрузку, горизонтальную и вертикальную, воспринимают элементы, построенные из дерева. В настоящее время такие плотины встречаются редко. Но было бы неправильно сказать, что их не строят вообще. Их возводят в районах, где основным строительным материалом является лес и куда затруднена доставка других строительных материалов. Достоинства таких плотин: использование лесоматериала сразу после заготовки на лесоразработках; возможность изготовления деталей на деревообрабатывающих заводах, стройплощадках, с последующей сборкой на месте возведения (подгонка и монтаж деталей), то есть с некоторыми оговорками их можно отнести к сборным сооружениям; незначительная доля использования других стройматериалов (кроме леса) — грунта, металлических соединительных элементов (скоб, болтов, нагелей, полосовой стали и прокатных профилей — в малых объемах).

К недостаткам деревянных плотин можно отнести: ограниченный срок службы из-за гниения дерева, особенно при его переменном смачивании, влияние влажности на деформации конструкций из дерева (усушка, коробление), региональная

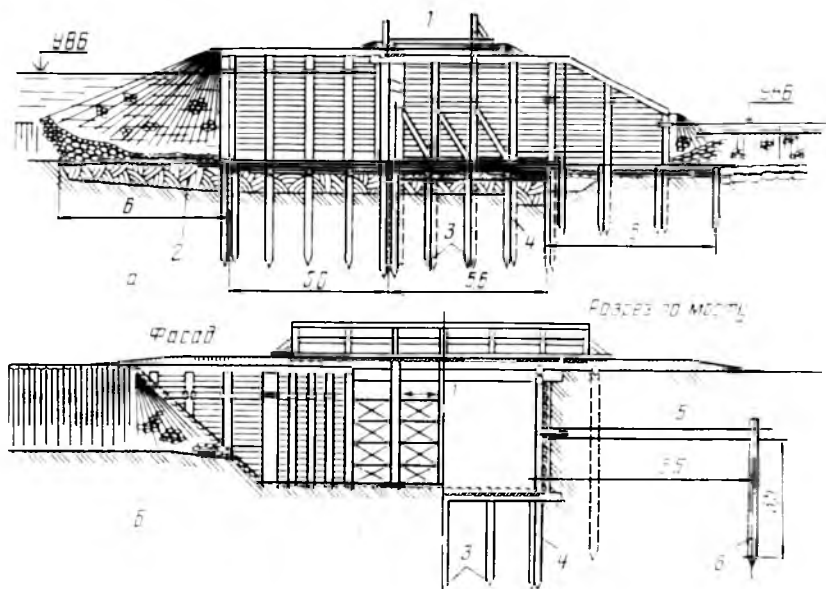


Рис 4.21. Свайно-обшивочная плотина:

а — продольный разрез; *б* — поперечный разрез; 1 — мост; 2 — флютбет из суглинки или глины; 3 — полая свая; 4 — стенная свая; 5 — анкерная схватка; 6 — анкерная свая (размеры в м)

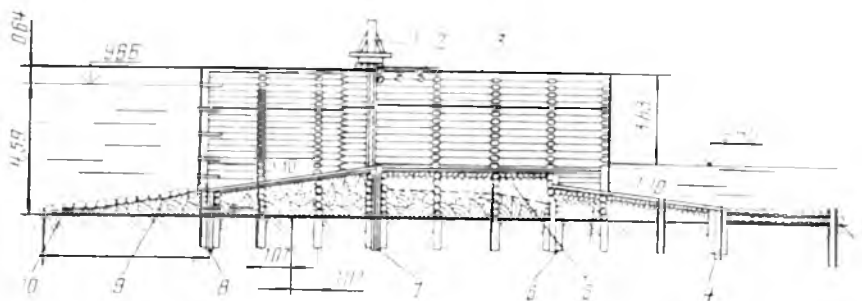


Рис. 4.22. Продольный разрез по ряжевой плотине со свайно-ряжевым флютбетом:

1 — ворот; 2 — мост; 3 — бык; 4, 6, 7, 8 — шпунтовые стенки; 5 — загрузка песчано-гравийной смесью; 9 — предпояурная подушка; 10 — мощение (размеры в м)

ограниченность применения — лишь в районах, богатых лесом.

Деревянные плотины строят водосбросными и водосливными и подразделяют их по типу пролетного строения и флютбета на следующие основные типы.

Свайно-обшивные плотины. В них стенки береговых устоев (рис. 4.21), поддерживающие грунтовую обратную засыпку, делают из свай, обшиваемых досками. Иногда вместо свай делают стойки, устанавливаемые на специальных брусках, которые размещают по контуру устоя или быка, — это стоечно-обшивные плотины.

В свайно-обшивных и стоечно-обшивных плотинах флютбет выполняют на сваях, заполняя грунтом области под полом.

Ряжевые плотины. В них береговые устои, флютбет, быки сооружают из ряжей. Иногда ряжевый флютбет располагают на сваях. Разрез по ряжевой плотине представлен на рисунке 4.22.

Бывают водосливные ряжевые плотины, выполненные из наклонных ряжевых клеток.

Контрфорсные плотины. Это плотины, как правило, на свайном флютбете. В них опорами для проезжего и служебного моста (для управления затворами) служат специальные деревянные фермы-контрфорсы, расположенные через 3...4 м по пролету; между контрфорсами устраивают стойки, являющиеся опорами для затворов.

Плотины из тканевых материалов. В связи с расширением производства пластмасс, синтетических материалов появились предложения и технические решения по использованию этих материалов для возведения плотин. Экспериментальные и теоретические исследования В. И. Сергеева, О. Г. Затворницкого и других доказали возможность применения и широкого внед-

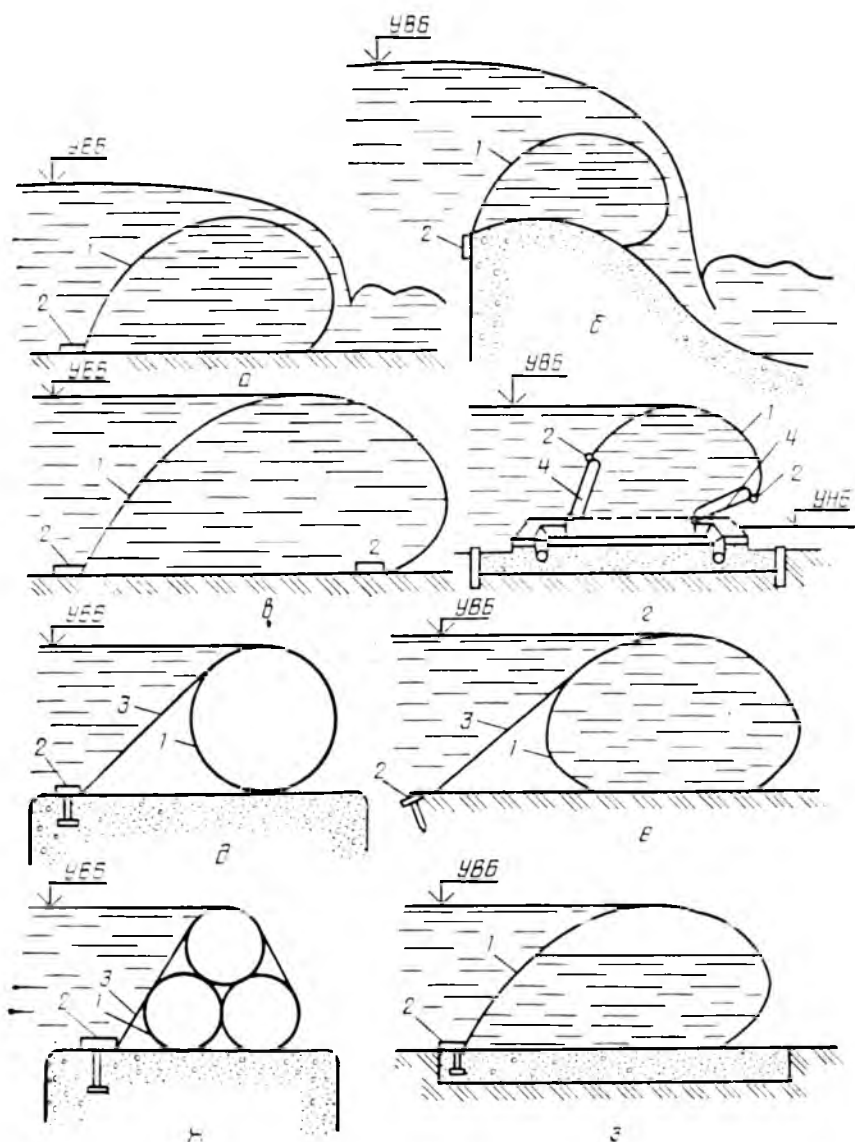


Рис. 4.23 Примеры конструктивных схем плотин в виде мягких замкнутых цилиндрических оболочек:

а, б, в, г — водонаполняемые; д, ж — воздушнонаполняемые; е, з — воздушно-водонаполняемые; 1 — оболочка, 2 — анкерный зажим; 3 — тросы, удерживающие полотнища; 4 — шарнирные поплавок-опоры

рения мягких конструкций в гидротехническом строительстве, и в том числе в плотинах.

Основными материалами, которые можно применять для мягких элементов конструкций плотин, это резиново-тканевые, пленочно-тканевые и пленочные материалы.

Плотины с применением мягких материалов строят для небольшого напора (до 5 м) высотой 6...8 м.

Основные типы плотин из тканевых материалов: *наполняемые* (водой, воздухом, водой с воздухом), *мембранные*, *комбинированные* (рис. 4.23).

Основные достоинства таких плотин: относительно низкая стоимость, возможность широкой индустриализации процессов изготовления элементов и их монтажа в сооружении, уменьшение срока строительства по сравнению с аналогичными сооружениями, возводимыми из бетона, железобетона, грунта. Основные недостатки: старение под воздействием света, воздуха, льда и других климатических факторов и малый опыт их эксплуатации.

4.5. БЕТОННЫЕ ГРАВИТАЦИОННЫЕ ПЛОТИНЫ

Как строительный материал бетон, и тем более железобетон, значительно дороже (иногда в десятки раз), чем грунт и камень. Однако бетонные плотины широко распространены в мировой практике. Плотина, построенная из бетона, обладающего высокой прочностью и сопротивляемостью размывающему действию фильтрационного потока (фильтрационной прочностью), при одних и тех же нагрузках имеет более обжатый профиль, а значит, и меньший объем материала, чем грунтовая или каменная плотина. Приготовив бетонную смесь на заводе, укладывать ее в сооружение можно и в мороз, и в дождь, и в жару (при относительно небольших размерах поперечного профиля бетонной плотины рабочее пространство легко изолировать от влияния внешних факторов). Иное дело — строительство грунтовой плотины: грунты, особенно глинистые, должны иметь заданную влажность (уплотнить размокшую глину или песок невозможно), а это значит, что в период дождей работы прекращают. Невозможно хорошо уплотнить и смерзшийся грунт. Следовательно, на строительство грунтовой плотины может затрачиваться больше времени, чем бетонной.

Бетон обладает высокой сопротивляемостью размывающему действию водного потока, поэтому непосредственно в теле бетонной плотины могут быть устроены водопропускные отверстия, а в грунтовой плотине для этого строят отдельные бетонные сооружения.

Таким образом, хотя при сопоставлении затрат на возведение собственно плотины бетонные всегда оказываются дороже грунтовой или каменной, стоимость всего гидроузла (плотина и водопропускные сооружения) с учетом указанных факторов (в т. ч. и фактора времени) для бетонного варианта плотины может оказаться ниже, чем для грунтового.

Гравитационной плотиной называют подпорное сооружение, устойчивость которого против сдвига от действующих на него нагрузок обеспечивается силой собственного веса конструкции. Это бетонная стена, глухая или снабженная отверстиями для пропуска воды. В последнем случае ее называют водосбросной.

4.5.1. ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ ЭКОНОМИЧНЫЙ ПОПЕРЕЧНЫЙ ПРОФИЛЬ

Рассмотрим действующие на бетонную гравитационную плотину основные нагрузки, предположив, что вода в НБ отсутствует, поверхность контакта бетона с основанием плоская (рис. 4.31). Можно предположить, что упрощенный (теоретический) профиль такой плотины будет иметь вид треугольника с вершиной на уровне воды в ВБ. Действительно, в точке А нагрузки равны нулю; они линейно возрастают к основанию, что требует соответствующего увеличения размеров сечения конструкции. Исходя из этого, будем искать поперечный профиль в виде прямоугольного треугольника, полагая, что вертикальная напорная грань является наиболее удобной из соображений производства работ.

Поскольку бетон — плохо растяжимый материал, вертикальные напряжения на напорной грани плотины, где появление трещин наиболее вероятно и опасно для сооружения, должны быть сжимающими либо, в предельном случае, равными нулю, то есть $\sigma' \geq 0$.

Плотина будет устойчива, если сумма сдвигающих нагрузок, приложенных к ней, будет меньше усилий сопротивления сдвигу. В данном случае сдвигающей является сила гидростатического давления W (в общем случае — сумма всех горизонтальных сил ΣH_i , приложенных к плотине). Удерживает сооружение от сдвига сила трения между бетоном и грунтом основания, равная произведению суммы всех вертикальных сил ΣV_i , приложенных к плотине, на коэффициент трения f по контактной поверхности $B-C$ либо на коэффициент сдвига f_0 , если по контакту развиваются и силы сцепления.

Таким образом, плотина будет устойчива, если

$$f_0 \Sigma V_i > \Sigma H_i \text{ или } f_0 \Sigma V_i / \Sigma H_i = K_3 \geq 1, \quad (4.8)$$

где K_3 — обобщенный коэффициент запаса против сдвига. В предельном случае, на границе между состоянием покоя и движения, $K_3 = 1$.

Рис. 4.24. Определение теоретического профиля гравитационной плотины

Профиль плотины должен удовлетворять и третьему условию $\sigma'' \leq [\sigma]$, требующему, чтобы ни в одной точке плотины главные напряжения не превышали сжимающие напряжения, безопасные для бетона. Для гравитационных плотин это требование, как правило, удовлетворяется автоматически, если выдержаны первые два. Теоретический профиль плотины в виде прямоугольного треугольника, удовлетворяющий предельным значениям критериальных зависимостей $\sigma' = 0$ и $K_3 = 1$, будем называть экономичным профилем.

Для условий плоской задачи и наполненного водохранилища (эксплуатационный случай) нагрузки, приложенные к сооружению, приведены на рисунке 4.24.

Здесь α_1 — коэффициент понижения фильтрационного напора на подошву плотины, обусловленного фильтрационными свойствами основания и влиянием противофильтрационных мероприятий; ρ_b и ρ_w — объемные массы бетона и воды.

При заданной форме поперечного профиля параметр (относительная ширина профиля), определяющий экономичность плотины, $n = b/h$.

Из сопротивления материалов известно, что для условия внецентренного сжатия нормальные краевые напряжения в сечении можно найти (для плоской задачи) по выражению

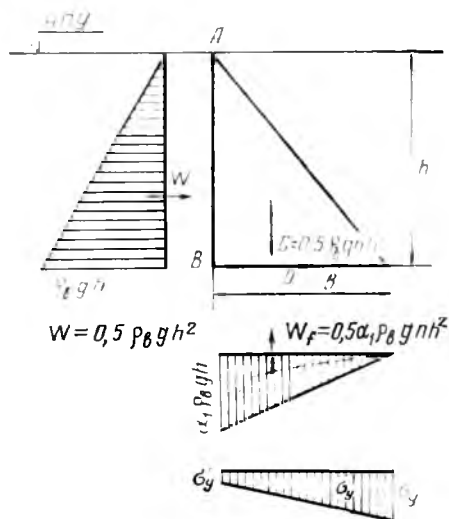
$$\sigma^{1,2}_y = \Sigma V_i / t \cdot 1 \pm \Sigma M_i 6 / t^2 \cdot 1,$$

где ΣV_i — сумма сил, нормальных к сечению, т; ΣM_i — сумма моментов сил относительно середины сечения; t — высота сечения, м; 1 — размер расчетного сечения в направлении от плотины, м.

Тогда напряжения σ_y' на напорной грани профиля в точке В с учетом того, что $t = b = nh$, будут равны

$$\sigma_y' = \Sigma V_i / nh - \Sigma M_i 6 / n^2 h^2. \quad (4.9)$$

Определив значения моментов сил W , G , W_ϕ относительно точки O опорного сечения $A-C$, подставляем их в выражение



(4.9) и, приравняв σ_y' к нулю, после преобразований получим

$$n = 1 / \sqrt{\rho_6 / \rho_b - \alpha_1}. \quad (4.10)$$

Подставив значения действующих нагрузок в критериальную зависимость (4.2) и приравняв K_3 к единице, найдем

$$n = 1 / f_0 (\rho_6 / \rho_b - \alpha_1). \quad (4.11)$$

Из выражений (4.10) и (4.11) видно, что экономичность профиля возрастает с увеличением сопротивления основания сдвигу и эффективности противофильтрационных мероприятий (уменьшением α_1). Расчеты по этим зависимостям показывают, что для скальных оснований средней прочности $n = 0,7 \dots 0,8$ (при $\alpha_1 = 0,5 \dots 0,6$).

4.5.2. РЕАЛЬНЫЕ ПРОФИЛИ ПЛОТИН

Рассмотренный выше теоретический экономичный профиль бетонной плотины был получен, исходя из допущения однородного прочного основания, невозможности превышения уровней воды над расчетным и отсутствия волн в ВБ. Далее, мы полагаем, что бетон плотины водонепроницаем и нет необходимости в теле ее устраивать какие-либо полости. Однако реальные условия существенно отличаются от указанных допущений, что приводит к необходимости вносить коррективы в расчетный теоретический профиль плотины как в нижней, прискальной, так и в надземной ее части. Скальные основания оказываются расчлененными системой трещин от малых (с раскрытием в доли миллиметра) до разломов (шириной в несколько метров), заполненных рыхлыми разрушенными породами. При проектировании стараются расположить плотину на удалении от разломов, однако избежать трещин, даже относительно крупных, не удастся. Чаще всего наиболее трещиноватым оказывается верхний слой скалы (на глубину от 3...5 до 10 м), подверженный действию процессов выветривания. По мере удаления от поверхности трещиноватость основания, как правило, уменьшается, а его сдвиговые характеристики улучшаются при снижении водопроницаемости.

При сопряжении бетонной плотины с основанием возникает задача о толщине удаляемого слоя слабой скалы. Теоретически возможно «посадить» плотину прямо на естественную поверхность, предварительно лишь выровняв ее. Однако малые значения f_0 и высокая водопроницаемость (а значит, и большое значение α_1) приведут к увеличению относительной ширины профиля плотины n [см. формулы (4.10) и (4.11)]. То есть чем больше толщина удаляемого слоя, тем меньше n и выше плотина. Очевидно, существует оптимальная высота $t_{эк}$, при

которой затраты на возведение сооружения минимальны. Обычно в практике удаляют так называемую «разборную» скалу, то есть верхний сильно выветрелый слой пород, снятие которого возможно без применения взрывов. Мощность этого слоя 3...5 м, иногда — больше. Решение об удалении «неразборной» скалы принимают на основе технико-экономического анализа.

Часто вместо того, чтобы удалять значительные объемы трещиноватых пород, их укрепляют, заполняя трещины цементным раствором. При этом улучшаются как прочностные, так и фильтрационные свойства скалы. Укрепительную цементацию (рис. 4.25, а) проводят после укладки бетона в плотину на высоту 3...5 м. Затем через бетон бурят скважины глубиной 3...15 м и нагнетают в них цементный раствор. Крупные трещины расчищают от заполняющего материала и бетонируют. После схватывания бетона цементируют контактные зоны, заполняя образовавшиеся пустоты и мелкие примыкающие трещины.

Снижение объема бетона может быть достигнуто рациональной формой врезки плотины в основание, например, с наклоном в сторону ВБ, как это показано на рисунке 4.25, б. В этом случае для того, чтобы сдвинуть плотину, нужно заста-

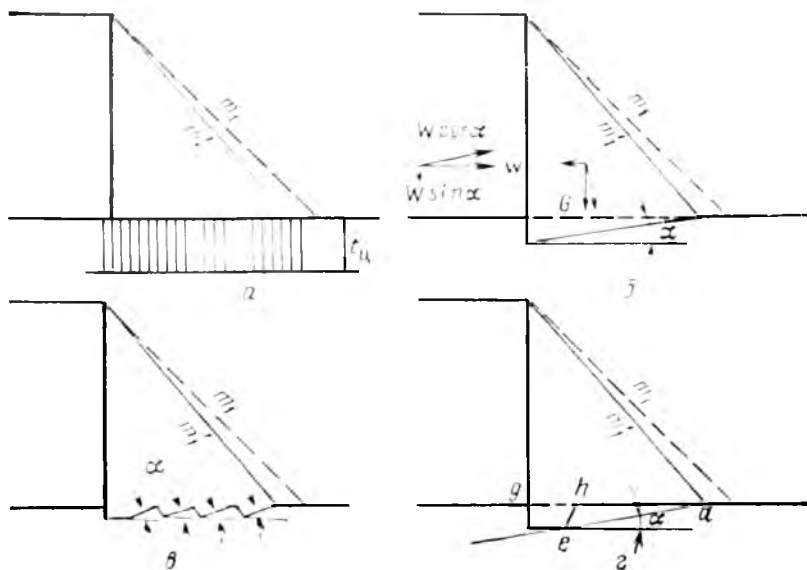


Рис. 4.25. Рациональные схемы врезки плотины в основание:

а — плоская; б — наклонная; в — ступенчатая; г — с верховым зубом; m_1 — уклон нижней грани при плоской врезке без проведения укрепительной цементации; m_1' — то же после выполнения; $t_{ц}$ — глубина зоны цементации; α — угол наклона

вить двигаться ее «в гору». Эффективность такого мероприятия значительна: при угле $\alpha = 10^\circ$ и нагрузках, показанных на рисунке 4.25,б, коэффициент запаса против сдвига вдвое выше, чем при горизонтальной поверхности врезки. Аналогичный эффект дает ступенчатая врезка с наклоном ступени в сторону ВБ (рис. 4.25,в).

Увеличению устойчивости сооружения способствует и устройство зуба в основании плотины вблизи напорной ее грани (рис. 4.25,г). Сдвиг в этом случае возможен по горизонтали $g-h-d$ со срезкой бетона зуба либо по наклонной поверхности $e-d$ со сдвигом скального массива $e-h-d$ (при таком решении под напорной гранью плотины возможно появление растягивающих напряжений, раскрытие трещин в скале и увеличение фильтрационного давления на подошву сооружения).

Противофильтрационные мероприятия в скальных основаниях бетонных плотин служат для уменьшения давления фильтрационного потока на подошву сооружения и недопущения опасных градиентов фильтрации, при которых возможны фильтрационные деформации заполнителя трещин пород основания.

В качестве основных противофильтрационных устройств в скальных основаниях применяют цементационные завесы и дренажи. Цементационные завесы необходимо устраивать в основаниях, сложенных слабоводоустойчивыми (размокающими) породами, а также содержащих много быстрорастворимых включений (гипсы, соли и т. д.) (СНиП II-54—77. Плотины бетонные и железобетонные).

Цементационная завеса — это вертикальная или наклонная узкая зона скальной породы, обычно под напорной гранью сооружения, водонепроницаемость которой улучшена путем заполнения трещин цементным раствором.

Завесу (см. рис. 4.26,а) доводят до слабодопроницаемых слоев породы. Если проницаемость основания меняется незначительно, глубину завесы l_z назначают равной половине действующего напора при условии обеспечения безопасных градиентов на ней (15...30). Если учесть, что фильтрационные потери на правильно выполненной завесе достигают 50...70% действующего напора, то при значении его 100 м толщина завесы должна быть не менее 2...4 м в верхней ее части.

Возможно устройство завесы одновременно с возведением тела плотины. Забетонировав нижнюю часть плотины на высоту 7...15 м, с поверхности бетона бурят скважины на проектную глубину. Для обеспечения заданной толщины завесы скважины бурят в один — три ряда с расстоянием между рядами 2...5 м. Скважины в соседних рядах располагаются в шахматном порядке; расстояние между ними в ряду также принимают 2...5 м. При нагнетании в скважину раствора под дав-

лением 6...10 МПа он распространяется по трещинам, заполняя их и создавая малопроницаемую зону.

Давление раствора на стенки горизонтальных и наклонных трещин может привести к их раскрытию и даже подъему скалы, особенно вблизи поверхности, где мал вес вышележащих слоев породы. Поэтому бурят скважины и нагнетают раствор после бетонирования части плотины, пригружая, таким образом, основание.

Часто цементационную завесу выполняют из галереи, устроенной в зубе плотины (рис. 4.26, б) или просто в нижней ее части (рис. 4.26, а). При устройстве многорядной завесы второй и третий ряды скважин бурят под углом к оси первого. В этом случае нет необходимости прекращать бетонирование плотины для сооружения завесы, возможно ее усиление и даже восстановление в процессе эксплуатации.

Дренаж основания плотин, применяемый вместе с завесой, позволяет снизить фильтрационный напор на подошву соору-

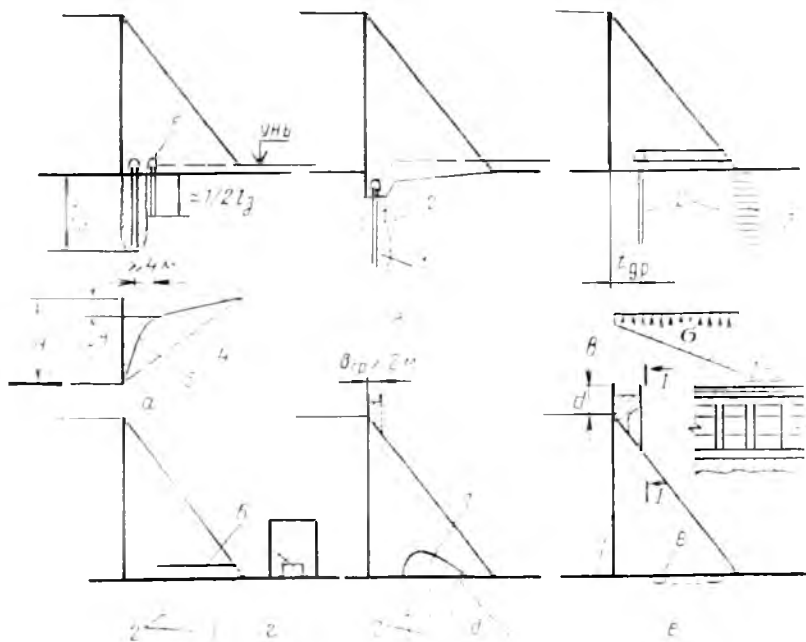


Рис. 4.26. Схемы устройства дренажей и завес плотин на скальном основании:

а — скважинный из дренажной галереи; б — из цементационной галереи; в — скважинный, без завесы; г — дренажная полость; д — продольная полость в основании; е — ленточный; 1 — цементационная завеса; 2 — дренажные скважины; 3 — зона уплотнения в скале; 4 — эпюра фильтрационных напоров без завесы и дренажа; 5 — то же, с завесой и дренажем; 6 — дренажная полость; 7 — продольная полость; 8 — канавки в скале, заполненные гравием

жения до $0,2 H$. Чаще всего его выполняют в виде ряда (или нескольких рядов) скважин через $2 \dots 5$ м, пробуренных в скале на глубину, примерно равную $0,5$ глубины цементационной завесы. Обычно дренажные скважины выходят в специальную галерею в теле плотины, но иногда их выполняют из цементационной галереи (см. рис. 4.26, б) под углом к оси завесы. Во всех случаях должен быть обеспечен беспрепятственный отвод воды из дренажа, поэтому галереи сообщаются с НБ и могут быть расположены выше его бытового уровня либо быть заглубленными (см. рис. 4.36, б). В первом случае профильтровавшаяся вода удаляется самотеком, во втором — создается подпор, несколько ухудшающий работу дренажа. Если основание плотины сложено маловодопроницаемыми породами и цементационная завеса неэффективна, дренаж — основное средство снижения фильтрационного противодавления. Его располагают на расстоянии $t_{др} = \Delta H / I$ (ΔH — потери напора до дренажа) от напорной грани, чтобы обеспечить допустимые значения градиентов напора I в основании (рис. 4.26, в). Под низовой гранью высоких плотин, где сжимающие напряжения велики, возможно уплотнение основания и уменьшение его водопроницаемости с образованием подпора на выходе фильтрационного потока. В этой ситуации целесообразно устройство дополнительного ряда дренажных скважин у низовой грани плотины. Устройство полостей в нижней части плотины в месте примыкания ее к основанию (рис. 4.26, г, д), особенно при вертикальном или сильнонаклонном расположении трещин в скале, также снижает фильтрационное давление. При горизонтальной ориентации трещин из этих полостей бурят вертикальные и наклонные скважины, создавая мощную дренажную систему. При небольших плотинах и вертикальных или наклонных трещинах дренаж основания может быть выполнен в виде системы продольных и поперечных канав, заполненных гравием и имеющих выход в НБ (рис. 4.26, е).

Верхнее строение плотины выполняют с учетом возможности превышения уровней ВБ над расчетным и наличия ветровой и сейсмической волны. Превышение гребня плотины над расчетным уровнем назначают аналогично грунтовым плотинам, заменяя высоту наката волны на откос высотой ветровой волны: $d = \Delta h + h_v + \delta$. По плотине устраивают служебный проезд, что определяет ширину гребня $b_{гр}$ не менее 2 м, а при необходимости — автомобильную или железную дорогу. Уширение и подъем гребня увеличивает массивность верхней части плотины (см. рис. 4.26, д, е): возрастают напряжения сжатия у напорной грани и снижаются — у низовой, что благоприятно для периода эксплуатации, но опасно в строительный период, когда отсутствует давление воды. Для предотвращения этого

стараятся по возможности облегчить верхнюю часть плотины, как это показано на рисунке 4.26, *е*, а напорную грань иногда делают слегка наклонной по всей высоте сооружения или только в нижней ее части (см. рис. 4.27, *а*).

Дренаж тела плотины. Галереи дренажные, цементационные и смотровые. Бетон не является абсолютно водонепроницаемым материалом: из-за значительного количества микро- и макротрещин, строительных и постоянных швов средняя водопроницаемость материала тела плотины оказывается значительной, соизмеримой, например, с проницаемостью суглинков, и тем большей, чем ниже уровень сжимающих напряжений. С учетом сказанного, нормы требуют обеспечить на напорной грани сжимающие напряжения от основного сочетания нагрузок не менее $0,25 \rho_b g y$ (y — глубина погружения расчетного горизонтального сечения под НПУ), что приводит к дополнительному увеличению относительной ширины l профиля плотины по сравнению с теоретическим.

Для уменьшения неблагоприятного влияния фильтрационного потока в теле плотины вдоль напорной ее грани устраивают полости — дрена, позволяющие отвести профильтровавшуюся воду в НБ (рис. 4.27, *а*). Дрены выполняют в виде труб из пористого бетона внутренним диаметром 15...30 см (рис. 4.27, *б*) либо в виде полостей, образованных, например, после удаления из свежееуложенного бетона металлической трубы, обернутой промасленной бумагой.

При небольшой высоте плотины дрена выводят в ту же галерею, куда и дренаж основания; в высоких плотинах воду из дренажа отводят в специальные продольные галереи в бетоне сооружения, выполняемые через 15...30 м по высоте, и через поперечные галереи — в НБ.

Эффективность дренажной системы видна из рисунка 4.27, *а*. Кривая *I* очерчивает область фильтрации в плотине без дренажа, а кривая *II* — в дренированном сооружении. В последнем случае насыщена водой лишь незначительная часть бетона. Фильтрационный напор по линии дренажа можно считать равным нулю, а потери напора Δh в зоне фильтрации — линейно возрастающими с глубиной: $\Delta h = y$. Поэтому с целью недопущения опасных градиентов в бетоне расстояния t (рис. 4.27, *в*) от напорной грани до линии дренажа принимают по формуле $t = y/I_{\text{доп}}$, но не менее 2 м (для бетона $I_{\text{доп}} = 20...40$). Устройство наклонных дрен нежелательно из соображений производства работ; для плотин с вертикальной напорной гранью приводит к необходимости ступенчатого очертания оси дренажа (рис. 4.27, *г*). В плотинах с наклонной гранью она может быть вертикальной (см. рис. 4.27, *г*).

Приведенные на рисунке галереи в теле плотины не только

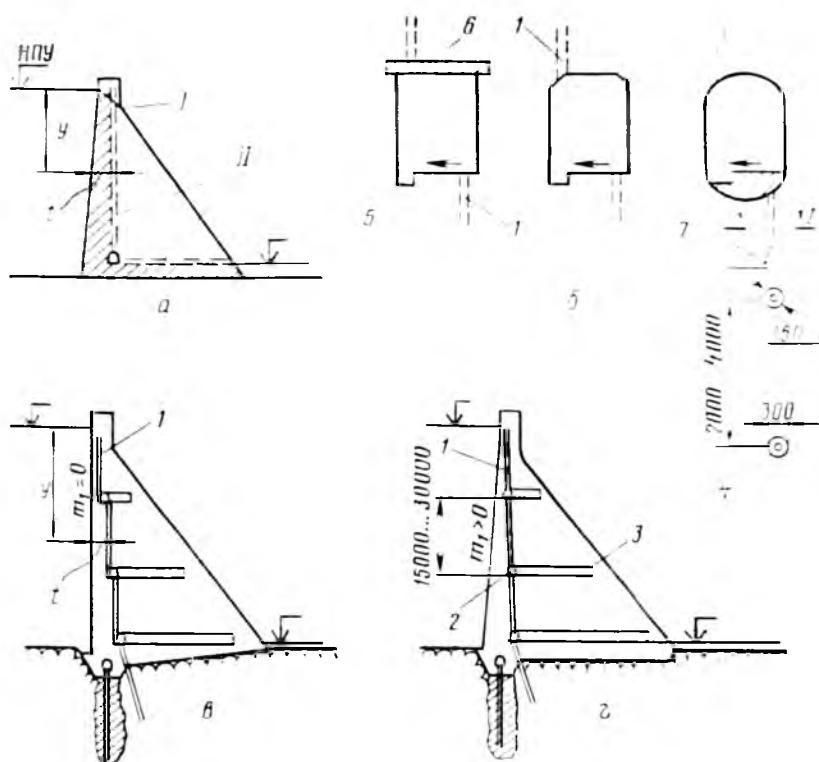


Рис. 4.27. Дренаж тела плотины:

а — схема действия дренажа; *1, II* — границы насыщения бетона плотины без дренажа и с дренажом; *б* — варианты конструкции галерей; *в, г* — устройство дренажа при вертикальной и наклонной грани плотины; *1* — дренажные отверстия; *2, 3* — продольные и поперечные галереи; *4* — дренажные трубы из пористого бетона; *5* — кювет; *6* — железобетонная плита; *7* — заполнение бетоном

принимают и отводят дренажные воды, но и служат для контроля состояния бетона, очистки дренажной системы, размещения коммуникаций (электрокабелей, воздухопроводов, трубопроводов), контрольно-измерительной аппаратуры и выполнения соответствующих измерений, а также в качестве ходов сообщения. Из галерей можно выполнять буровые и цементационные работы для улучшения фильтрационных свойств скалы основания либо бетона; в этом случае ее размеры должны допускать размещение соответствующего оборудования. Остальные галереи имеют минимальную ширину (1,2 м) и высоту (2 м). Обычная форма галерей — прямоугольная или со срезаемыми углами (см. рис. 4.27, б), а в зоне больших напряжений — сводчатого или овального очертания. Галереи смежных

ярусов соединяют между собой шахтами. Система галерей снабжена освещением, вентиляцией и имеет выходы на берега и гребень плотины.

4.5.3. РАЗРЕЗКА ПЛОТИН ШВАМИ

Ранее мы рассматривали плотину как монолитный бетонный брус треугольного профиля, перегораживающий водоток. В реальных условиях создать такую конструкцию невозможно по многим причинам, и в частности технологическим: для получения монолитного тела бетонирование необходимо вести непрерывно по всему фронту с высокой интенсивностью, что требует большой концентрации сил и средств и экономически нецелесообразно. Поэтому для одновременного бетонирования выделяют относительно небольшие объемы — блоки, разделенные между собой горизонтальными и вертикальными швами.

Немонолитность бетонных плотин также вызывается неравномерностью осадок основания. Это очевидно, когда основание по длине плотины сложено породами разной деформированности (см. рис. 4.28, *а*). В этом случае в бетоне на границах пластов основания появятся концентрации напряжений, вызывающие образование трещин. Но и на однородном деформируемом основании осадки плотины — бруса — неравномерны, поэтому вблизи основания должны появиться растягивающие напряжения, а значит, и трещины. И, наконец, появление трещин возможно в местах резкого изменения высоты плотины (точки *e*, *f*, *g* на рис. 4.28, *а*) в примыканиях к берегам. Нагрузки на основание от веса конструкции и его осадки справа и слева от этих точек сильно отличаются.

Другая причина появления в бетоне трещин — температурные напряжения. Как известно, твердение бетона сопровождается выделением тепла и повышением температуры забетонированного массива, иногда на десятки градусов. Если его основание жесткое и малодеформируемое, то в начальный период твердения расширение массива будет происходить относительно свободно, так как бетон на этом этапе обладает высокой пластичностью, которая со временем уменьшается. Набрав прочность, блок начинает остывать, стремясь уменьшиться в размерах. При этом сопротивление основания вызывает в нем растягивающие напряжения и развитие вертикальных трещин. Но и в массивах, не имеющих жесткой заделки, возможно появление температурных трещин. Схватываясь, массив увеличивается в размерах, поскольку тепло экзотермии приводит к возрастанию температуры бетона. Со временем поверхностный слой, теряя пластические свойства и остывая до температуры, близкой к температуре окружающей среды, стремится сокра-

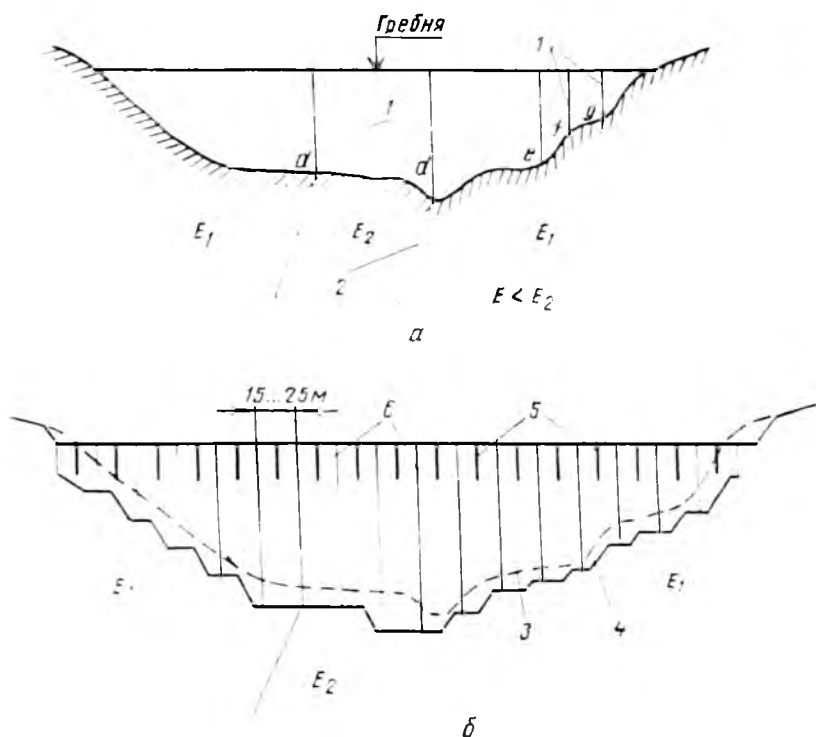


Рис. 4.28. Размещение швов плотины:

a — появление трещин в зонах неравномерных осадок основания; *б* — размещение постоянных швов гравитационной плотины; 1 — трещины; 2 — границы пластов с разными модулями упругости E ; 3 — контур дневной поверхности; 4 — контур врезки плотины; 5 — температурные швы; 6 — осадочные швы; *e, f, g* — точки резкого перелома рельефа основания; *d* — границы пластов

таться в размерах, как бы обжимая центральную, более горячую зону. Получается так, как если бы мы пытались натянуть на себя тесную рубашку: не обладая достаточной прочностью, она обязательно разорвется. Трещинообразование в поверхностном слое тем интенсивнее, чем больше разница температур внутри массива и на его поверхности.

Вероятность появления трещин по всем рассмотренным причинам возрастает с размерами бетонируемой конструкции. Сквозные вертикальные трещины не возникают при горизонтальных размерах блока бетонирования 10...25 м. По условиям предотвращения поверхностного трещинообразования эти размеры должны быть существенно (в 2...3 раза) меньшими. Опасность трещинообразования снижается и с уменьшением температуры разогрева бетона, а главное — с уменьшением пе-

репада температур между центральной зоной конструкции и окружающей средой.

Итак, поскольку построить абсолютно монолитное сооружение невозможно в силу указанных причин, а появление трещин вызывает опасную фильтрацию через бетон и снижает надежность конструкции, остается разбить плотину на такие блоки, размеры которых позволили бы предотвратить образование любых трещин. В результате реальное сооружение — конструкция, выполненная из монолитных блоков, отделенных друг от друга *швами* — искусственно организованными трещинами, снабженными *уплотнениями* — устройствами для предотвращения сквозной фильтрации.

Швы бетонных плотин делят на конструктивные (постоянные) и строительные (временные). *Конструктивные швы*, называемые также деформационными, могут быть осадочными, температурными и усадочными. Первые, разделяя сооружение на отдельные секции, должны допускать возможность их независимых перемещений как по вертикали, так и по горизонтали, без навала секций друг на друга. На скальных основаниях такие швы устраивают через 15...25 м по длине сооружения и, как правило, в местах изменения жесткости основания, резко-го изменения уклонов его поверхности (точки *c, d, e, f, g* на рис. 4.28, *a*), а также при сопряжении элементов разной массивности. В условиях скальных оснований, когда абсолютные осадки малы, а вызываемые ими перекосы секций незначительны, ширину шва определяют возможными температурными деформациями бетона (3...10 мм).

Температурные швы предотвращают трещинообразование бетона в зонах сооружения, подверженных сезонным колебаниям температуры. Такие швы могут быть сквозными, перерезающими сооружение до заданной отметки (рис. 4.28, *b*), и несквозными. В последнем случае их называют швами-надрезами. Ширину температурных швов назначают 1...5 мм из условий температурного расширения бетона. Назначение усадочных швов — предупреждение образования трещин, вызванных усадкой бетона, обычно эти швы совмещают с осадочными и температурными.

Длина блока бетонирования из условия недопущения температурных трещин составляет 10...25 м, тогда как ширина поперечного профиля плотины может достигать нескольких десятков метров. Указанные обстоятельства обуславливают разделение плотины в пределах каждой ее секции, выделенной осадочными швами, на строительные блоки.

Строительными называют горизонтальные, наклонные и вертикальные швы между строительными блоками. Как правило, после прекращения температурных деформаций бетона

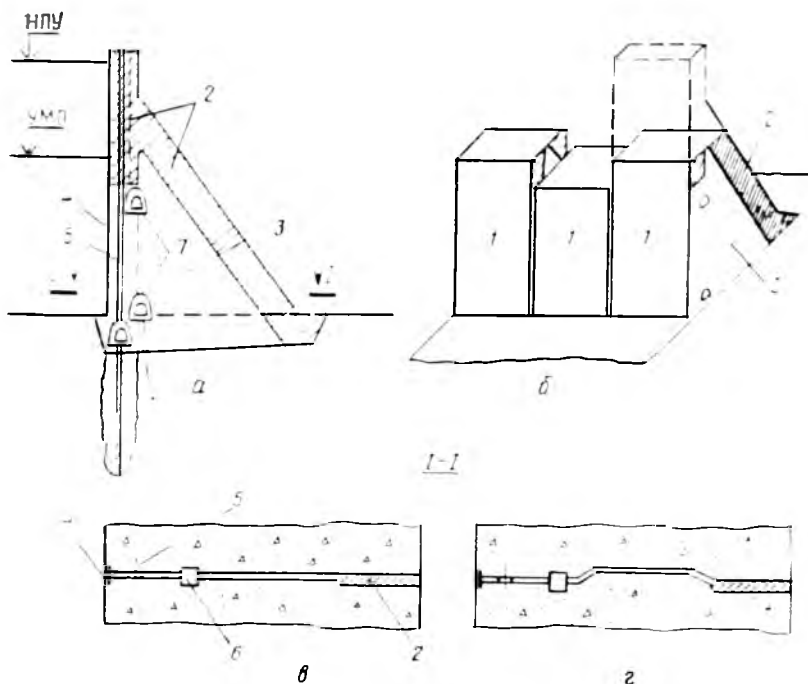


Рис. 4.29. Конструкция осадочного шва плотины:

а — разрез по плоскости шва; *б* — последовательность устройства шва; *в, г* — план шва плоского и штрабчатого; *1* — секции плотины; *2, 3* — заполнение широкой и узкой частей шва; *4, 7* — контурные уплотнения — наружное и внутреннее; *5* — главное уплотнение; *б* — дренажный колодец

такие швы омоноличивают, поэтому строительные швы являются временными. Постоянные (рис. 4.29, *а*) и временные швы могут быть плоскими и ломаными — штрабчатыми (рис. 4.29, *в, г*). Последние, являясь более сложными и трудоемкими, применяют, когда нужно, чтобы сдвигающее усилие, приложенное к одной части конструкции, эффективно передавалось на другую.

Конструктивные швы, допуская независимость перемещений соседних секций или их частей, должны обладать водонепроницаемостью, а также обеспечивать возможность наблюдения за работой шва и его ремонта.

Независимость перемещения обеспечивается заданной шириной шва и отсутствием сопротивления сдвигу в его плоскости. Обычно на скальных основаниях достаточно иметь в центральной части плотины, куда не проникают сезонные колебания температуры, шов шириной 1...3 мм и у граней плотины на глубине 3...6 м — до 10 мм (см. рис. 4.29, *в, г*).

Осадочные швы устраивают следующим образом. При строительстве одни секции возводят с опережением по сравнению с другими (рис. 4.29, б). Боковые поверхности ранее забетонированных блоков освобождают от опалубки (ограждения) и покрывают слоем жидкой битумной мастики. В зонах, где ширина шва должна быть значительной, на мастику наклеивают один или несколько слоев рулонных гидроизоляционных материалов либо наносят слои асфальтовой штукатурки. После такой подготовки поверхностей они служат ограждением для среднего блока, который бетонируют враспор к ним. До укладки в блок бетонной смеси должны быть приняты меры к устройству уплотнений и дренажа полости шва.

Заполнение шва (см. выше) и специальные уплотнения, контурные (наружные и внутренние) и основные, придают ему водонепроницаемость. Внутренние контурные уплотнения обеспечивают водонепроницаемость швов вокруг галерей и других полостей в бетоне плотины. Выполняют их в виде резиновых, пластиковых или металлических полос, заделанных в бетон соседних секций и перекрывающих шов (поз. 7 на рис. 4.29, а).

Наружные контурные уплотнения (поз. 4 на рис. 4.29) применяют для снижения водопроницаемости шва, его защиты от воздействия льда и плавающих тел, попадания в полость шва загрязнений.

Основные внутренние уплотнения обеспечивают водонепроницаемость швов плотины, воспринимая напор воды, и размещают их вблизи напорной грани (см. рис. 4.29). Они могут быть выполнены по типу диафрагмы 5, перекрывающей шов, аналогично внутренним контурным уплотнениям, либо в виде колодца — шпонки в полости шва, заполняемого битумными мастиками.

Воду, профильтровавшуюся через уплотнение или в обход него, отводят дренами или (в больших плотинах) через колодец 6 (см. рис. 4.29), устраиваемый за уплотнением и служащий и для осмотра полости шва. При необходимости этот колодец можно использовать для устройства резервного битумного уплотнения.

4.5.4. СПОСОБЫ СНИЖЕНИЯ СТОИМОСТИ ГРАВИТАЦИОННЫХ ПЛОТИН

Основными факторами, определяющими стоимость бетонных плотин, являются: содержание цемента (как наиболее дорогого компонента бетонной смеси) в единице объема сооружения; затраты труда по укладке бетона и устройству швов и объем самой плотины. В соответствии с этим можно выделить три возможных направления снижения стоимости таких плотин:

использование бетона с минимально необходимым содержанием цемента; применение индустриальных технологий их возведения и, наконец, разработка конструкций сооружений с уменьшенным объемом бетона.

Идея первого направления заключается в следующем. Распределение напряжений в гравитационной плотине неравномерно. Наиболее опасные — зона у напорной грани, где напряжения близки к нулю и возможно появление трещин, и зона у низовой грани с наибольшими значениями сжимающих напряжений. Требование обеспечения сжатия у верховой грани плотины приводит к тому, что даже в высоких плотинах несущая способность бетона основного объема сооружения используется не полностью. По условиям прочности здесь возможно использование бетона пониженной марки с малым содержанием цемента. Последнее определяется не только условиями прочности, но и стойкости по отношению к внешним воздействиям: фильтрационному и поверхностному потокам и климатическим факторам. Обычно по этим признакам выделяют четыре основные зоны: наружные части, не омываемые водой; наружные части в пределах колебания уровней в бьефе, а также периодически омываемые водой (водопропускные отверстия); наружные и примыкающие к основанию части плотин, находящиеся ниже минимальных эксплуатационных уровней воды в бьефах, и внутренняя часть плотины. Для первой зоны главное условие — морозостойкость. Бетон второй зоны должен быть водонепроницаемым, водостойким и одновременно морозостойким, а на водосливных поверхностях — обладать стойкостью к кавитации и истиранию. В третьей зоне требование морозостойкости снимается, здесь важны водонепроницаемость и водостойкость. К бетону обширной внутренней зоны предъявляются наименее жесткие условия, что позволяет использовать здесь смеси с малым содержанием цемента.

С учетом этого при строительстве крупных плотин в различные их части укладывают бетон разных марок, применяя так называемое *зонирование* бетона, сокращая объем дорогих бетонов (кавитационно-стойких, морозостойких) и расход цемента. Зональная укладка требует усложнения бетонного хозяйства, так как одновременно нужно готовить смеси с разными видами и содержанием цемента. Несколько усложняется и производство работ, однако даже с учетом этого экономическая эффективность по бетону составляет 10...20% для крупных плотин.

Уменьшение расхода цемента возможно и в других зонах гравитационной плотины, поскольку уровень напряжений и там невелик, если устроить на напорной грани водонепроницаемый экран из битумных либо полимерных материалов или метал-

личный. В зонах переменных уровней воды возможно применение синтетической теплогидроизоляции, а на низовой грани — теплоизоляции. В этих условиях вся плотина может быть построена из малоцементного бетона, с упрощенными конструктивными швами, даже без уплотнений. Существенное преимущество таких плотин — возможность быстрого их возведения, так как малое тепловыделение делает благоприятным термический режим кладки, снижая опасность трещинообразования. Плотина из малоцементного бетона по объему несколько больше обычной бетонной, однако экономия цемента в сочетании с возможностью широкого использования индустриальной технологии возведения делает такие конструкции экономически целесообразными.

Экономия цемента может быть достигнута заменой части бетона в средней, малонагруженной зоне плотины, например, камнем (рис. 4.30, а). Аналогичный эффект получают при втапливании крупных камней в бетонную смесь непосредственно в блоке (камнебетон). Экономическая эффективность этих мероприятий относительно невелика из-за усложнения производства работ.

В наибольшей степени идея замены части бетона дешевыми материалами реализована в ячеистой плотине (рис. 4.30, б). Здесь устойчивость сооружения обеспечивается за счет веса грунта, заполняющего ячейки, а прочность — применением высокомарочных бетонов и некоторого армирования конструкции. Экономия расхода бетона по сравнению с гравитационной плотиной достигает 40...50%, однако экономия стоимости значи-

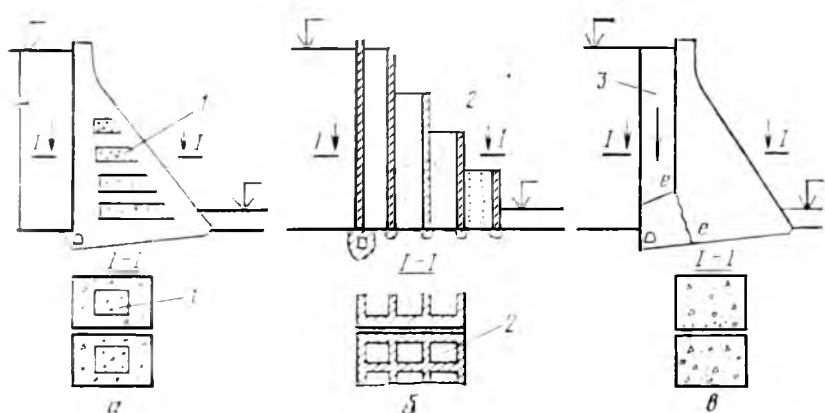


Рис. 4.30. Конструкция плотин с заменой части веса бетона пригрузкой:

а — с полостями, заполненными камнем; б — ячеистая; в — с консольной плитой в ВБ;
1 — камень; 2 — грунт; 3 — пригружающий объем воды

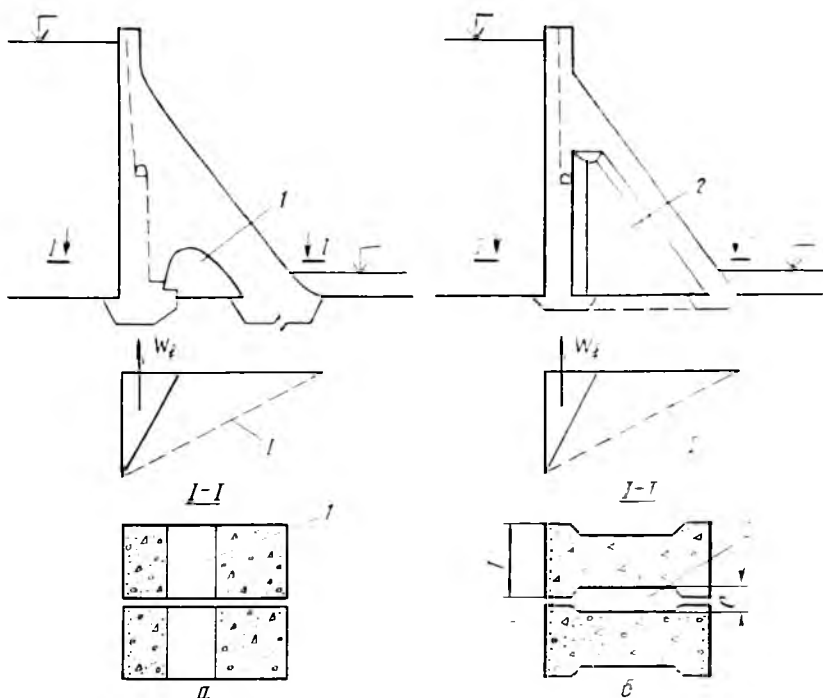


Рис. 4.31. Облегченные плотины с продольной полостью (а) и расширенными швами (б):

W_f — сила фильтрационного давления; I — эпюра для гравитационной плотины; I — продольная полость в основании плотины; 2 — полость расширенного шва

тельно меньше, что обусловлено как усложнением бетонных работ (тонкие армированные конструкции), так и необходимостью увязки их с засыпкой ячеек грунтом и его уплотнением.

В случае, если объем плотины (относительная ширина профиля) определяется условием устойчивости против сдвига, добиться экономии бетона можно, используя пригрузку сооружения водой, как показано на рисунке 4.30, в. При этом, однако, в сечении $e—e$ возникают растягивающие напряжения, что требует армирования конструкции, снижая эффективность такого решения.

Существенную экономию бетона (до 30...40%) дают заанкеренные плотины. Дефицит сжимающих напряжений в напорной зоне плотины обжатого профиля здесь восполняется усилием натяжения стального анкера, проходящего через отверстие в бетоне плотины и заделанного в прочное основание. Анкеры натягивают домкратами, расположенными в зоне гребня,

после чего полости отверстий заполняют цементным раствором, получая благоприятное распределение напряжений в конструкции.

На прочных основаниях, когда лимитирующим оказывается требование прочности сооружения, значительная экономия бетона (до 15%) может быть получена за счет использования водонепроницаемых экранов на верховой грани плотины. В таких сооружениях допускается развитие растягивающих напряжений и раскрытие горизонтальных швов с напорной стороны при значительных, близких к предельно допустимым для бетона, сжимающих напряжениях на низовой грани. Применение плотин с экранами сдерживается относительной сложностью их конструкции и дефицитностью используемых для устройства экрана материалов.

Наиболее часто стремятся добиться экономии бетона, уменьшая силы фильтрационного противодействия на подошву сооружения. Примером реализации этого способа служит плотина с продольной полостью в основании (рис. 4.31, а). За счет дренарующего влияния полости фильтрационное давление действует лишь на подошву верхового зуба, что позволяет получить до 10% экономии бетона.

Другим примером являются плотины с расширенными швами (рис. 4.31, б), позволяющие также экономить до 10% бетона за счет дренарующего действия этих швов. Обычно для таких плотин отношение ширины шва e к толщине секции l составляет 0,15...0,4. Наличие широких швов несколько усложняет производство работ, поэтому реальная экономия стоимости по сравнению с обычной гравитационной плотиной несколько меньше экономии бетона и составляет 5...7%.

4.6. КОНТРОРСНЫЕ ПЛОТИНЫ

4.6.1. УСТРОЙСТВО, КЛАССИФИКАЦИЯ И УСЛОВИЯ ПРИМЕНЕНИЯ

Уменьшение объема бетона гравитационной плотины устройством расширенных швов ограничено. Так, при относительной ширине $n=0,75$, характерной для гравитационной плотины на слабом скальном основании с коэффициентом сдвига $f_0=0,7$, ширина шва e может составить только около 25% полной ширины секции l . Дальнейшее облегчение конструкции возможно, если сделать напорную грань наклонной и использовать вес воды над ней в качестве пригрузки, компенсирующей дефицит сил тяжести (рис. 4.32).

Бетонные облегченные плотины с широкими швами и пригрузкой воды над наклонной напорной гранью называют *контр-*

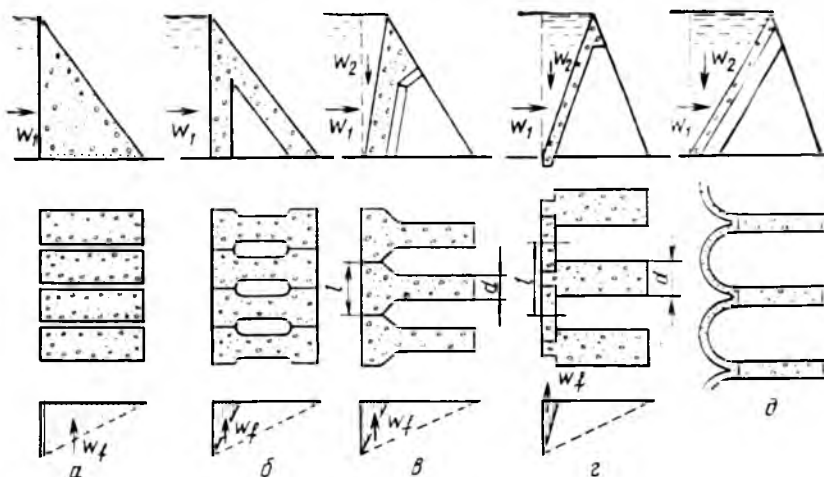


Рис. 4.32. Схемы к анализу работы контрфорсных плотин:

а — массивно-гравитационная; *б* — с расширенными швами; *в* — массивно-гравитационная; *г* — с плоскими перекрытиями; *д* — многоарочная

форсными. Обычно для таких конструкций высотой 50 м и более характерно отношение $l/d > 2 \dots 2,5$ (где d — толщина контрфорса), а относительная ширина профиля $n = b/h = 0,9 \dots 1,2$. Контрфорсная плотина может быть расчленена на две функциональные части: напорное перекрытие и контрфорсы (см. рис. 4.32). Перекрытие, воспринимая гидростатическое давление с пролета, передает его на контрфорс, а последний — на основание, обеспечивая устойчивость всего сооружения против сдвига. Плотину, напорное перекрытие которой представляет массивный консольный оголовок — выступ самого контрфорса (см. рис. 4.32, *в*), называют *массивно-контрфорсной*. Гидростатическое давление может восприниматься плитами, опирающимися на контрфорсы, в этом случае говорят о плотинах с *плоскими перекрытиями* (см. рис. 4.32, *г*). Плотины, напорное перекрытие которых выполнено в виде сводчатых конструкций, называют *многоарочными* (см. рис. 4.32, *д*).

Контрфорсные плотины бывают глухие и водостивные, их строят как на скальных, так и на нескальных основаниях. В последнем случае нижнюю часть контрфорса уширяют, превращая ее в фундаментную плиту. Аксонометрическое изображение двух схем контрфорсных плотин показано на рисунках 4.34 и 4.36. Благодаря большой распластности профиля и значительному удерживающему моменту от веса пригрузки воды над напорной гранью, распределение напряжений в основании контрфорса более равномерное, чем в случае гравитационной

плотины при лучшем использовании несущей способности бетона. За счет этого экономия бетона в контрфорсных плотинах может достигать 20...60% (большие значения — для многоарочных конструкций).

Вместе с тем сложность конструкции (наличие пустот и тонких элементов) затрудняет применение индустриальных технологий, увеличивая трудоемкость работ, поэтому стоимость единицы объема бетона контрфорсных плотин на 5...25% выше, чем гравитационных. При высотах до 100...120 м экономическая эффективность массивно-контрфорсных и многоарочных плотин примерно одинакова (плотины с плоскими перекрытиями эффективны до высот 40...60 м). Однако многоарочные плотины более требовательны к качеству основания, хуже переносят сейсмические воздействия и температурные нагрузки. Поэтому, несмотря на несколько большую экономичность многоарочных конструкций, их строят реже, чем массивно-контрфорсные.

4.6.2. МАССИВНО-КОНТРФОРСНЫЕ ПЛОТИНЫ

Массивно-контрфорсные плотины состоят из секций таврового, двутаврового и коробчатого сечения, разделенных осадочными швами (рис. 4.33). Плотины, выполненные по схеме *a*...*г*, называют плотинами с одиночными контрфорсами, и они имеют ширину секций 10...20 м, а по схеме *д* — с парными, двояными или полыми контрфорсами, ширина которых 20...34 м. Обычно высота массивно-контрфорсных плотин составляет 40...120 м. Верховой оголовок предназначен для восприятия нагрузок от воды и передачи их на относительно тонкую плиту — контрфорс, низовой — для увеличения площади поперечного сечения контрфорса в наиболее нагруженной его зоне, а также для образования закрытой полости с регулируемым температурным режимом, что очень важно при строительстве в суровых климатических условиях. Если низовой оголовок по условиям прочности не нужен, то полость между контрфорсами может быть перекрыта утепляющей стенкой (пунктир на рис. 4.33, *а, в*).

Наиболее удобна в отношении производства работ плоская форма оголовка, однако это приводит к появлению в нем растягивающих напряжений (рис. 4.33, *а*), поэтому часто верховые оголовки делают круговыми или полигональными, несколько усложняя конструкцию (рис. 4.33, *в, г*). В таком случае составляющие гидростатического давления, перпендикулярные оси контрфорса, обжимая оголовок, снимают растяжение. Сопряжение оголовков, особенно верхового, с плитой-контрфорсом стремятся сделать плавным во избежание опасных concentra-

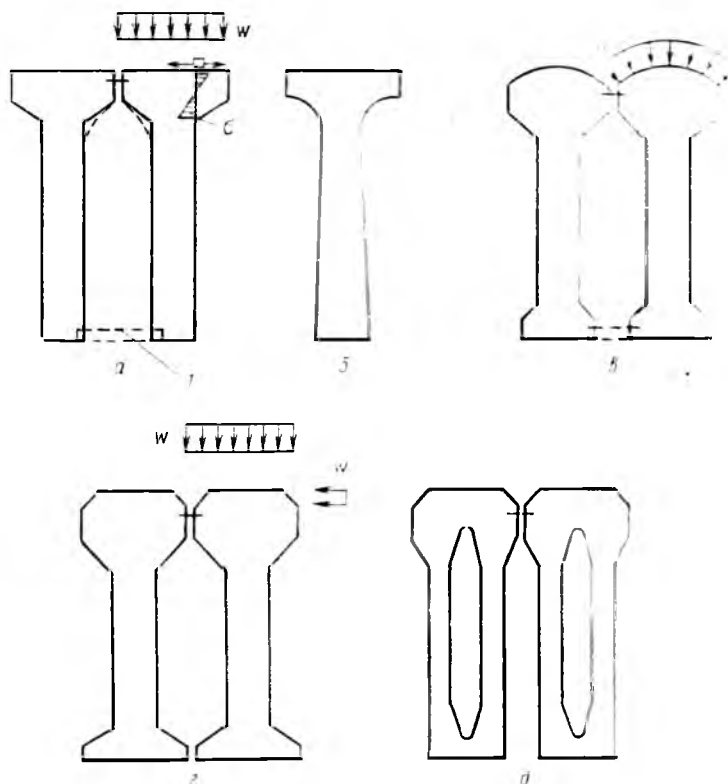


Рис. 4.33. Горизонтальные сечения массивно-контрфорсных плотин:

w — гидростатическое давление; σ — эпюра горизонтальных напряжений в головке; 1 — отепляющая стенка

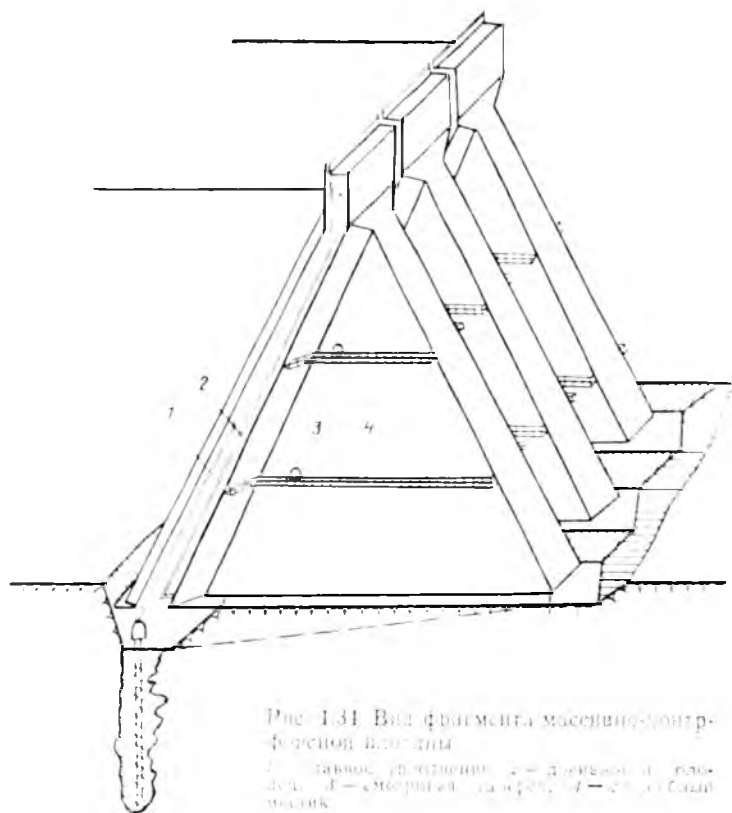
ций напряжения в этой зоне; при больших значениях l/d — по круговым или эллиптическим кривым (см. рис. 4.33, а, б).

Для уменьшения числа дорогих осадочных швов оголовки двух соседних секций могут быть выполнены как одно целое, что создает благоприятные условия для устройства водопропускных отверстий в полости сдвоенного контрфорса.

Контрфорсы плотин по условиям удобства строительства делают, как правило, прямоугольными в плане, хотя из условий статической их работы желательна более сложная форма горизонтального сечения, показанная на рисунке 4.33, б. С высотой толщина контрфорсов обычно уменьшается по мере снижения нагрузок от давления воды.

Тело массивно-контрфорсной плотины дренируется полостями между контрфорсами, но в высоких сооружениях с массивными оголовками устраивают дополнительные дренажные отверстия, как в гравитационных плотинах, с выводом их в полости. Для осмотра бетона в период эксплуатации в контрфорсах выполняют галереи через 20...30 м по высоте, соединяя их между собой служебными мостиками. Устраивают мостики и по периметрам полостей (рис. 4.34), что облегчает контроль за работой сооружения.

Из фрагмента массивно-контрфорсной плотины с одиночными контрфорсами, показанной на рисунке 4.34, видно, что нижняя (прискальная) и верхняя (гребневая) зоны такой плотины конструктивно мало отличаются от обычной гравитационной. В части сопряжения с основанием нужно лишь заметить, что каждый контрфорс, как правило, размещают на горизонтальной площадке, тогда как секции гравитационной плотины имеют ступенчатую врезку (см. рис. 4.28). Аналогичны по конст-



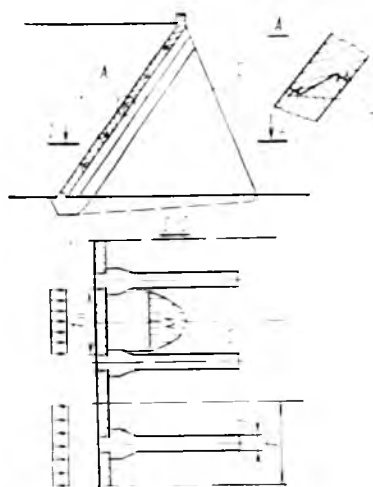


Рис. 4.35. Схема плотины с плоскими перекрытиями:

А — стык плит; М — эпюра изгибающих моментов в плите; 1 — плита перекрытия; 2 — контрфорс; 3 — консольные выступы; 4 — мetailлическое уплотнение

рукции и швы этих плотин, правда, у массивно-контрфорсной несколько сложнее размещать уплотнения в связи с малой шириной боковой поверхности оголовка.

4.6.3. ПЛОТИНЫ С ПЛОСКИМИ ПЕРЕКРЫТИЯМИ

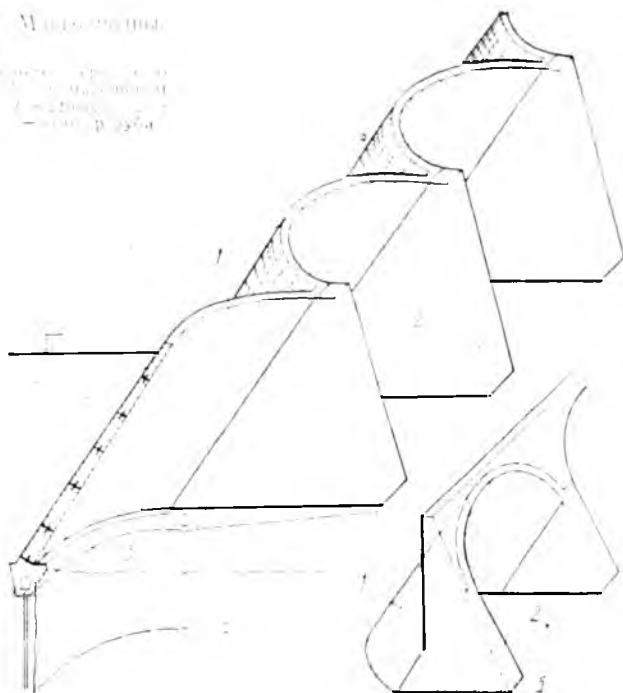
Конструктивная схема таких плотин приведена на рисунке 4.35. Давление воды воспринимают плиты напорного перекрытия,

опирающиеся на консольные выступы контрфорсов. Для обеспечения герметичности стыка плиты и контрфорса его заполняют битумной мастикой или асфальтом. В расчетном отношении такая плотина распадается на две системы: контрфорс, главными для которого являются гидростатическая нагрузка с двух примыкающих полупролетов $l/2$ плотины, вес двух полуплит перекрытия и собственный вес, и плита пролетом l_n , нагруженная гидростатическим давлением и собственным весом. С увеличением расстояния между контрфорсами воспринимаемые ими нагрузки возрастают, что позволяет лучше использовать прочностные свойства бетона. В то же время с увеличением пролета плиты в ней быстро растут изгибающие моменты и растягивающие напряжения, для восприятия которых плиты нужно сильно армировать. Устранить эти противоречия можно, устраивая тонкие контрфорсы на относительно небольшом расстоянии друг от друга. В конечном итоге такая плотина превращается в сложную тонкостенную железобетонную конструкцию, достаточно экономичную лишь при напорах до 30...50 м. Дальнейший шаг в развитии идеи контрфорсных плотин — использование перекрытий такой формы, где изгибающие моменты отсутствуют или настолько малы, что не вызывают опасных растягивающих напряжений. Такими плотинами являются многоарочные.

4.6.4. МНОГОАРЧНЫЕ ПЛОТИНЫ

Расчетную схему таких плотин, как и плотин с плоскими перекрытиями, расчленяют на две системы: контрфорс, нагруженный гидростатическим давлением на две примыкающие к

Рис. 4.36. Металлические
плотины
с — сечение арки, в — сечение
контрфорса, М — момент, N —
сила, D — диаметр, L — длина,
K — коэффициент



нему полуарки, весом арок и собственным весом, и арка, жестко или шарнирно опирающаяся на контрфорсы (рис. 4.36).

Поскольку нагрузки, передаваемые на контрфорсы, значительны, то для повышения жесткости последних их устраивают с ребрами жесткости, либо двойными.

Напорным перекрытиям в сечении, перпендикулярном напорной грани, придают, как правило, форму круговой арки, наиболее простой в изготовлении. По высоте перекрытия разрезают строительными швами в диаметральной плоскости. Конструкция шва может быть аналогичной приведенной на рисунке 4.36. Толщина арочных перекрытий изменяется по мере заглубления под уровень воды. Поскольку полностью избежать изгибающих моментов в арках не удастся, их армируют, особенно в ключе и примыканиях к контрфорсам. Соединение напорных перекрытий с контрфорсами чаще всего делают жестким, что наиболее просто по условиям производства работ. Возможно решение, когда опорные плиты, жестко связывающие пяты арок, опираются на контрфорс через скользящий шов (см. рис. 4.36). В этом случае плотина менее чувствительна к осадкам основания.

Напорные перекрытия в многоарочных плотинах по условиям прочности могут быть очень тонкими. Для обеспечения фильтрационной прочности тонких арок устраивают гидроизоляцию их напорной поверхности.

При строительстве в суровых климатических условиях полость между контрфорсами изолируют от колебаний внешних температур, делая перекрытие по низовой грани контрфорсов либо вертикальную утепляющую стенку по оси плотины.

Арки с основанием сопрягают зубом, повторяющим форму перекрытия в плане при больших расстояниях между контрфорсами (см. рис. 4.36, а). В этом случае и противофильтрационная завеса сооружения будет иметь соответствующее очертание. При малых пролетах арок можно устраивать широкий зуб по всей ширине арочного перекрытия с завесой прямолинейного очертания.

Варианты верхнего строения многоарочных плотин показаны на рисунке 4.36, а, б. В первом из них проезд устраивают по верху арок, при необходимости уширяя их в этой зоне. Возможно и устройство мостового перехода между контрфорсами. Во второй схеме арки отсекают плоскостью, совпадающей с низовой гранью плотины, и верх сооружения надстраивают, создавая прямолинейный массивный гребень. Такое решение, являясь несколько более тяжелым, улучшает проезд по плотине и увеличивает ее жесткость в направлении от берега к берегу, что полезно в условиях землетрясения. В остальном устройство многоарочных плотин аналогично массивно-контрфорсным.

Расстояние между контрфорсами может быть значительным (до 50...70 м и более). Так, плотина Даниель Джонсон (Канада) высотой 216 м имеет центральную арку с пролетом между осями контрфорсов 161,5 м и 13 арок с пролетами 78,2 м. Дальнейшее увеличение их высоты ограничивается условиями прочности и устойчивости контрфорсов, сама арка же может перекрывать пролеты значительно больших размеров, однако для этого она должна опираться непосредственно на скальные берега ущелья. Такую плотину называют арочной.

4.7. АРОЧНЫЕ ПЛОТИНЫ

Арочная плотина — бетонный свод, обращенный выпуклостью в сторону ВБ, с пятами, упирающимися в берега (рис. 4.37). Таким образом, большая часть давления воды передается непосредственно на борта ущелья, сопротивление которых сдвигающим усилиям и определяет устойчивость конструкции. В силу этого объем бетона в арочной плотине может быть в 1,5...3 раза меньше, чем в гравитационной.

Форма арки и ее экономичность в большей степени зависят от размеров и формы ущелья, которое она перекрывает (рис. 4.37). Важный параметр, влияющий на конструкцию арки,—относительная ширина створа (отношение длины хорды верхней арки плотины—ширины ущелья к ее высоте L_x/h). Наиболее благоприятны для строительства арочных плотин ущелья узкие с $L_x/h < 2$ и средней ширины $2 \leq L_x/h \leq 3$, хотя возможно строительство и в широких створах с $L_x/h = 7$ и даже до 10. При треугольной форме ущелья с ростом гидростатического давления уменьшается пролет арки, что позволяет не существенно увеличивать толщину плотины к основанию; в прямоугольных створах с увеличением глубины толщина арки должна возрастать, чтобы избежать перегрузки конструкций. В прямоугольных створах и створах с большим значением L_x/h целесообразны цилиндрические плотины, у которых напорная грань вертикальная и очерчена постоянным радиусом R (см. рис. 4.37, а). Для треугольных створов характерны плотины с постоянным центральным углом и возрастающей книзу кривизной арок (см. рис. 4.37, б).

В узких створах часто применяют плотины двоякой кривизны или купольные (см. рис. 4.37, б, в). Кривизна в вертикальной плоскости позволяет сделать такую конструкцию наиболее экономичной, исключив вертикальные растягивающие напряжения.

В створах по схеме рисунка 4.37, в нижнюю узкую часть перекрывают бетонной гравитационной пробкой, а верхнюю — аркой. Последнюю отделяют от пробки горизонтальным или слегка наклонным в сторону ВБ швом, устраивая в нем противофильтрационное уплотнение. Аналогичный шов иногда устраивают по всему контуру плотины (в этом случае его называют контурным или периметральным), отделяя арку от более массивной части — седла, прилегающего к скале. Седло служит для придания опорному контуру симметричной формы с гладкими очертаниями, что улучшает работу плотины, делая распределение напряжений в конструкции более равномерным и снимая растяжение в нижней ее части.

Тщательно подбирая форму, в арке, как правило, удается исключить опасные растягивающие напряжения, что позволяет строить такие плотины из бетона, не прибегая к конструктивному армированию даже при очень тонких арках $n = b/h < 0,2$.

Наибольшую высоту (271,5 м) из арочных плотин имеет Ингурская, но это не предел, поскольку такие конструкции обладают высокой надежностью и приспособляемостью к внешним воздействиям.

При сопряжении арочных плотин с основанием осуществляют уже известные противофильтрационные мероприятия — за-

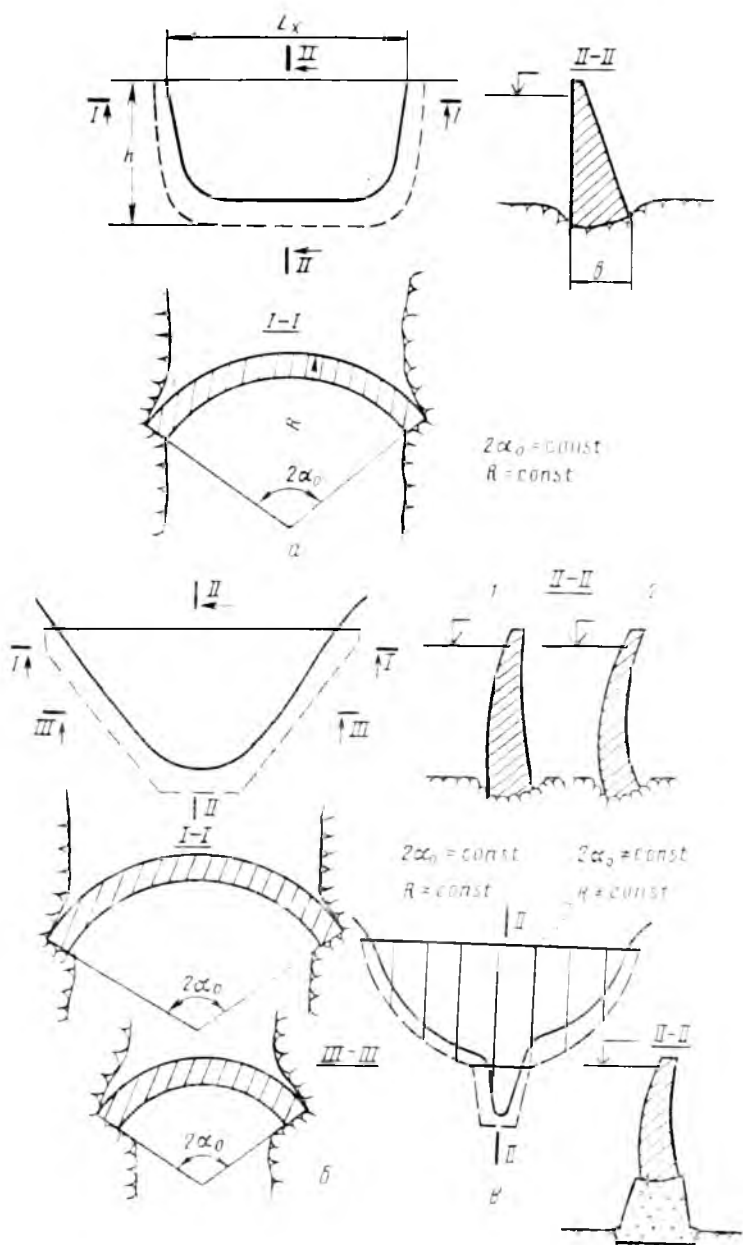


Рис. 4.37. Схемы арочных плотин в ущельях разной формы:

a — цилиндрическая; *b* — с постоянным центральным углом (1) и купольная (2); *в* — в пробкой; 3 — временные температурные швы

весу, как правило, цементационную и дренаж. Главное назначение завесы — уменьшение градиентов напора в основании до допустимых пределов, что очень важно при малой ширине арки понизу. В отличие от бетонных плотин других типов в арочных снижение фильтрационного давления не имеет существенного значения, поскольку устойчивость здесь определяется не весом плотины, а сопротивлением сдвигу береговых массивов, на которые арка передает нагрузки. Поэтому завеса не обязательно должна быть приближена к напорной грани; ее сдвигают к середине подошвы, если под напорной гранью в основании возможны растягивающие напряжения, либо бурят скважины через бетон плотины непосредственно из НБ.

Дренаж тела плотины выполняют при толстых арках, особенно работающих в суровых климатических условиях, для предотвращения выветривания бетона низовой поверхности. Воду из дренажа, по конструкции аналогичного дренажам гравитационных пластин, отводят в смотровые галереи. Особенностью последних в арочных плотинах является плавность форм, чтобы уменьшить концентрации напряжений. В тонких арках, где градиенты высоки и дренаж нецелесообразен, для предохранения низовой поверхности сооружения ее покрывают слоем теплоизоляционного материала или устраивают специальную утепляющую стенку.

Арочные плотины, являясь распорными конструкциями, не имеют сквозных температурно-осадочных швов. В период строительства тело сооружения расчленяют на секции — столбы шириной по фронту плотины 10...15 м (см. рис. 4.37, в) вертикальными или близкими к ним штрабчатыми швами. Цементируют шов после остывания бетона и затухания деформаций усадки.

4.8. ВОДОСБРОСЫ В ТЕЛЕ БЕТОННЫХ ПЛОТИН НА СКАЛЬНЫХ ОСНОВАНИЯХ

Водосбросные отверстия плотин по высоте их расположения подразделяют на поверхностные (водосливные), донные и глубинные (рис. 4.38). Обычно поверхностные служат для пропуска паводка в эксплуатационный период, донные — для пропуска расходов в период строительства. Часто после его окончания донные отверстия заделывают бетоном, но в плотинах небольшой и средней высоты их можно использовать и при эксплуатации гидроузла для удаления наносов, скопившихся в ВБ, или его опорожнения в случае ремонта плотины, а также для подачи в русло санитарных расходов. Глубинные отверстия используют для пропуска паводка через недостроенное сооружение. После окончания строительства они могут работать сов-

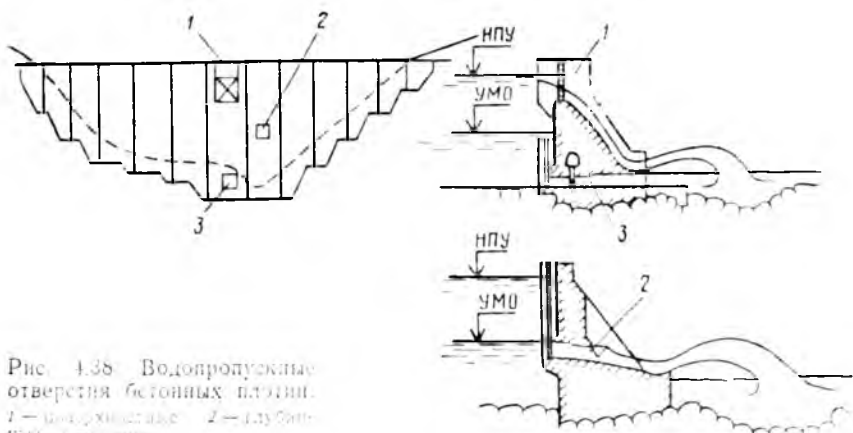


Рис. 438. Водопропускные отверстия бетонных плотин.

1 — вертикальные; 2 — горизонтальные.

местно с эксплуатационным водосбросом, пропуская часть сбросного расхода, а в межсезонный период — и санитарные расходы.

Достоинство поверхностных водосбросов — их доступность для осмотра и ремонта, что обеспечивает большую надежность сооружения. Глубинные водосбросы, в свою очередь, позволяют при той же площади поперечного сечения пропустить значительно большие расходы через поверхностные, они менее подвержены воздействию льда и плавающих тел, поэтому оба этих типа применяют в равной степени часто.

Основные требования, предъявляемые к водосбросам: обеспечение заданной пропускной способности, безопасное сопряжение сбросного потока с НБ плотины; долговечность и надежность работы.

Пропускная способность поверхностных водосбросов плотин на скальных основаниях обеспечивается прежде всего правильным выбором напора на гребне и очертания водосливной поверхности. Как правило, для плотин большой и средней высоты применяют безвакуумные профили водосливов со значительными напорами (до 15...17 м) на них. Обычно водосливы устраивают в гравитационных плотинах — в пределах одной или нескольких секций, в контрфорсных с толстыми или полыми контрфорсами (массивно-контрфорсных или многоарочных) — по низовой поверхности контрфорсов. В плотинах с тонкими контрфорсами водосливную поверхность образуют, перекрывая плитой полости между ними. В арочных плотинах делают лишь часть водосливного профиля, несколько утолщая, если нужно, арку в месте расположения водосброса.

Пропускную способность Q ($\text{м}^3/\text{с}$) таких водосбросов рассчитывают по формуле водослива практического профиля с учетом толщины и формы бычков и ширины водосливных пролетов:

$$Q = \epsilon m b_{\text{пр}} H_0 \sqrt{2gH_0},$$

где ϵ — коэффициент бокового сжатия потока; m — коэффициент расхода водослива; $b_{\text{пр}}$ — ширина водосливных пролетов, м; H_0 — напор на гребне водослива (с учетом скорости подхода), м.

Удельные расходы водослива на скальном основании могут достигать 60...120 $\text{м}^3/\text{с}$ на 1 м ширины.

В глубинных (и донных) водосбросах высоких плотин пропускная способность определяется напором z_0 (м) над верхней кромкой сечения, где напорное движение потока переходит в безнапорное, площадью ω_v (м) этого сечения и гидравлическими сопротивлениями по напорному тракту по формуле

$$Q = \mu \omega_v \sqrt{2gz_0},$$

где μ — коэффициент расхода.

На величину коэффициента расхода μ большое влияние оказывает плавность очертаний входного участка, поэтому его выполняют круговой или эллипсовидной формы, обеспечивая безотрывное обтекание потоком. Внутреннюю поверхность водосброса делают гладкой, без резкого изменения формы.

В гравитационных и арочных плотинах глубинные водосбросы устраивают в одной или нескольких секциях (см. рис. 4.38), в плотинах с толстыми или полыми контрфорсами — в теле последних.

Важным при проектировании водосбросов является обеспечение безопасного сопряжения высокоскоростного выходящего потока с НБ. Здесь применяют известные режимы сопряжения: донный с затопленной струей (рис. 4.39, а); при помощи низкого уступа с незатопленной струей (рис. 4.39, б) и высокого носка — трамплина отброшенной струей (рис. 4.39, в). Крайний случай последнего режима — сопряжение свободно падающей струей (рис. 4.39, г), характерное для арочных плотин, когда поток на последнем участке своего движения падает под прямым углом к поверхности НБ и, растекаясь в водяной подушке у дна, образует поверхностные валцы.

Первый из названных способов сопряжения хорош тем, что при всех расходах воды режим остается неизменным с фиксированным непосредственно у плотины положением гидравлического прыжка. При таком режиме даже достаточно прочная скала размывается затопленной струей. Поэтому зону гидравлического прыжка крепят бетонной массивной монолитной пли-

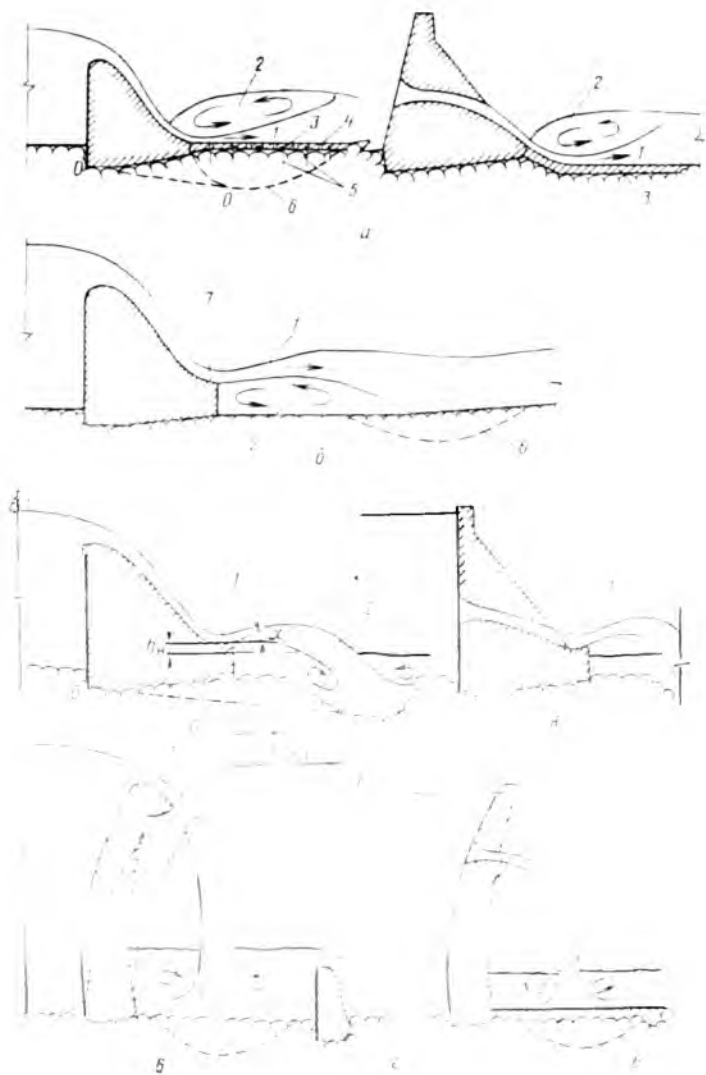


Рис. 4.39. Виды сопряжения потока с НБ:

а — донный с затопленной струей; *б* — поверхностный с незатопленной струей; *в* — с отброшенной струей; *г* — со свободно падающей струей; *1* — струя; *2* — валец; *3* — крепление дна (водобой); *4* — дренажные отверстия; *5* — анкерное крепление; *6* — яма размыва; *7* — носок-уступ; *8* — носок-трамплин; *9* — водобойная стенка; *О-О* — возможная поверхность сдвига плотины

той 3, способной противостоять взвешивающему действию фильтрационного потока снизу. При всей своей определенности и высокой надежности этот способ сопряжения дорог, и применяют его преимущественно на слабых скальных и нескальных основаниях. С целью уменьшения объема бетона плиту делают относительно тонкой, с дренажными отверстиями 4 для разгрузки фильтрационного потока, заанкеривая ее в прочную скалу (см. рис. 4.39, а).

При второй схеме сопряжения транзитная струя 1, сходя с носка уступа, располагается над донным вальцом 2 и достигает дна далеко от сооружения, где размывы 6 менее опасны, чем в первой схеме. Через такой водосброс удобно пропускать лед, плавающие тела. Однако применение этого режима целесообразно при относительно невысоких плотинах, значительных глубинах и малых колебаниях уровня в НБ.

Идея третьей схемы — отбросить струю 1, сходящую с высокого носка-трамплина 8, на такое расстояние от плотины, где размывы 6 уже не угрожают ее устойчивости сдвигом по линии $O-O$ (см. рис. 4.39). На скальных основаниях средней прочности достаточно, чтобы расстояние L_p от носка до начала ямы размыва было не менее половины высоты плотины. Отлет струи $L_{отл}$ можно регулировать, варьируя высоту h_n носка-трамплина над уровнем НБ и угол наклона α его поверхности к горизонту. Такое сопряжение бьефов широко применяют при высоких плотинах любых типов, так как оно просто и дешево.

Схема сопряжения падающей струей характерна для арочных плотин. Поскольку в этом случае трудно получить высокую скорость потока 1 на сходе с носка-трамплина водосброса 8, отлет струи оказывается небольшим, что может привести к опасным размывам 6 вблизи плотины. Условия сопряжения улучшаются при увеличении наклона арки в НБ, поэтому такое решение удобно для купольных плотин (пунктир на рис. 4.39, в). Для защиты дна от размыва можно с помощью дополнительной плотины-стенки 9 увеличить глубину воды в месте падения струи либо защитить бетонной плитой 3. При строительстве арочных плотин возможны и другие схемы сопряжения.

Долговечность и надежность работы водосбросных сооружений при достаточной пропускной способности и правильно запроектированном сопряжении потока с НБ определяются степенью приспособленности водосброса к устранению аварийных ситуаций и удобством его ремонта, стойкостью элементов водопропускного тракта (от оголовка до конструкций НБ) к абразивному (истирающему) и кавитационному воздействию высокоскоростного потока. Стремление к обеспечению большей надежности всех элементов увеличивает стоимость строитель-

ства, но снижает затраты на эксплуатацию и ремонт сооружения при авариях. Следовательно, нужно добиваться разумной, рациональной надежности, когда суммарные расходы на строительство и ремонт, а также устранение аварийных ситуаций и их последствий будут наименьшими.

Очевидно, что при малом числе водопропускных отверстий выход из строя одного из них существенно увеличивает опасность для всего сооружения, а увеличение их числа повышает трудоемкость строительства и суммарную стоимость его. Поэтому число и вид водосбросных сооружений выбирают технико-экономическим сравнением различных вариантов.

Существенную опасность для водосбросов высоких плотин представляют скорости потока, достигающие 30...40 м/с. При таких скоростях бетон подвергается размыву и интенсивному истиранию наносами, а в зонах пониженного давления возникает кавитация, приводящая к прогрессирующей эрозии не только бетона, но и металлических конструкций. Кавитация — возникновение в потоке пузырьков, заполненных парами жидкости и растворенными в ней газами, обусловленное местными понижениями пьезометрического давления. Попадая в зоны повышенного давления, пузырьки захлопываются с выделением энергии. Захлопывание на твердой границе приводит к разрушению ее материала — кавитационной эрозии. Основные направления борьбы с ней: недопущение в сооружении опасных понижений давления (исключения возможности кавитации), захлопывания пузырьков на твердых границах, устройство покрытий из кавитационно-стойких материалов.

Для защиты от истирания наносами поверхность бетона при очень больших скоростях потока облицовывают блоками из камня твердых пород, металлом, специальным бетоном с добавкой коротких обрезков стальной проволоки, полимербетоном. Все эти мероприятия одновременно снижают и опасность кавитационной эрозии.

4.9. БЕТОННЫЕ ПЛОТИНЫ НА НЕСКАЛЬНЫХ ОСНОВАНИЯХ

4.9.1. НАЗНАЧЕНИЕ И ОСНОВНЫЕ ТИПЫ ВОДОСБРОСНЫХ ПЛОТИН

В отличие от плотин на скале, бетонные плотины на не-скальных основаниях как самостоятельные подпорные сооружения не применяют. Они выполняют лишь функции водосбросов в гидроузлах с грунтовыми плотинами. Объяснение этому легко найти, воспользовавшись формулой (4.11). Анализ теоретического профиля бетонной плотины на песках с коэффи-

циентом трения $f=0,4$ показывает, что ее основание должно быть равно 1,4 высоты, тогда как для грунтовой это соотношение составляет 5...6, то есть объем последней оказывается лишь в 3,5...4,8 раза больше. Если принять во внимание, что стоимости 1 м³ бетона и грунта, уложенных в сооружение, различаются в 10...15 раз, станет ясно, что возводить глухие бетонные плотины на не скальных основаниях нецелесообразно. Таким образом, бетонная плотина на не скальном основании — массив распластанного профиля, имеющий отверстия для пропуска воды и создающий напорный фронт гидроузла совместно с грунтовой плотиной. Водопропускные отверстия могут быть поверхностными — с высоким и низким порогом и донными. Схемы поперечного сечения плотин с отверстиями указанных видов представлены на рисунке 4.40. Плотины по схеме *а, б* называют водосливными. Конструкцию по схеме *а* применяют при значительных напорах (до 25 и даже до 40 м). Плотины с низким порогом устраивают обычно в низконапорных гидроузлах (до 8...10 м) для удаления наносов, скопившихся в ВБ, и пропуска расходов как при строительстве гидроузла, так и в период эксплуатации. Конструкция с глубинным

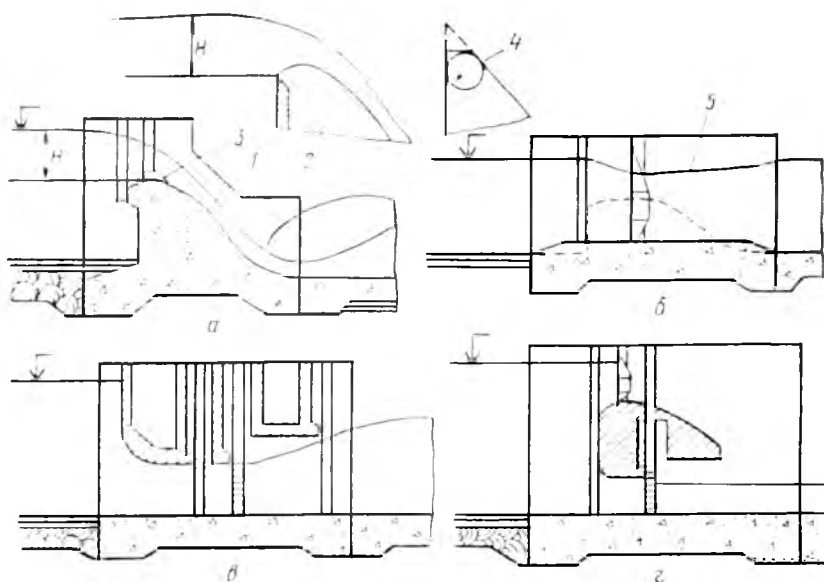


Рис. 4.40. Основные типы бетонных плотин на не скальных основаниях:

а, б — водосливные с высоким и низким порогом; *в* — с донными отверстиями; *г* — двухъярусная; 1 — безвакуумный водосливной профиль; 2 — очертание безвакуумного профиля по нижней кромке струи; 3 — вакуумный профиль; 4 — построение вакуумного профиля; 5 — трапецидальный водосливной профиль

водосбросом (схема *в*) обладает большой пропускной способностью (работая в напорном режиме) и удобна при пропуске расходов в период строительства гидроузла. Однако осмотр и ремонт ее затруднены. Схема *г*, совмещающая достоинства поверхностных и глубинных водосбросов, конструктивно сложна и менее удобна в ремонте, чем первая. Из-за указанных причин водосливные плотины наиболее часто используют в практике гидротехнического строительства.

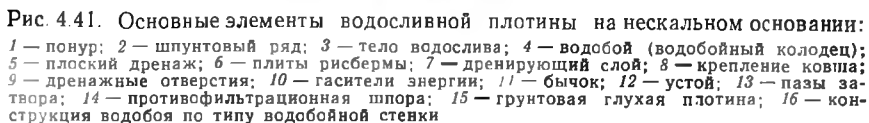
4.9.2. ТИПЫ ВОДОСЛИВНЫХ ПРОФИЛЕЙ

В средненапорных гидроузлах, как правило, устраивают безвакуумные водосливы практического профиля, очерченного по форме нижней поверхности струи, переливающейся через тонкую стенку (схема *а* на рис. 4.40), а в низконапорных — водосливы с широким порогом либо трапецеидальные с закругленными кромками (на схеме *б* рис. 4.40).

Для увеличения пропускной способности сооружения возможно использование водослива вакуумного профиля (см. рис. 4.40, *а*). Такой профиль может быть получен из трапецеидального вписыванием в него окружности либо эллипса. Пропускная способность вакуумного водослива на 10...15% выше, чем безвакуумного, что позволяет, при равной пропускной способности, снизить напор на нем, уменьшив высоту затвора на 5...9%. Целесообразно применение водосливов такого профиля в плотинах без затворов, когда гребень располагают на отметке нормального подпорного уровня и паводковые расходы сбрасывают по мере превышения отметок НПУ. В этом случае отметка форсировки будет меньше, а следовательно, снизятся отметки гребня грунтовой плотины и ее стоимость и уменьшатся площади земель, временно затапливаемые в ВБ.

4.9.3. СОПРЯЖЕНИЕ ПОТОКА С НБ

Конструкция плотины на нескальном основании представлена на рисунке 4.41. Основной элемент ее поперечного профиля — водослив 3, переходящий в НБ в плиту водобоя 4 и рисберму 6 с концевой частью — креплением ковша 8. В ВБ к водосливу примыкает понур 1, защищающий от размыва участок дна, прилегающий к плотине. Поток, падая с водослива, обладает избыточной энергией. Для получения донного режима сопряжения с затопленной струей необходимо, чтобы бытовая глубина в русле h_6 была несколько больше второй сопряженной глубины h'' (рис. 4.42). В этом случае непосредственно за водосливом образуется надвинутый гидравлический прыжок, в



Если глубина в русле недостаточна, отметку дна НБ у водослива искусственно понижают, как это показано на рисунке 4.41, устраивая водобойный колодец либо создавая подпор с помощью водобойной стенки 16.

Для того чтобы усилить рассеяние энергии, на пути транзитной струи, в зоне сжатой глубины устанавливают дополнительные препятствия — гасители 10. Это позволяет сократить длину крепления за водосливом.

На границе прыжкового участка двузначная эпюра скоростей становится однозначной (см. рис. 4.42, а), но сохраняет большую неравномерность распределения по вертикали и значительные величины у дна, превосходящие неразмывающие скорости для грунта русла. По мере удаления от водослива продолжается трансформация эпюры: возрастают скорости v в верхней зоне потока и уменьшаются у дна. Очевидно, крепление НБ может быть закончено на расстоянии $L_{кр}$, там, где донные скорости станут меньше неразмывающих v_n .

Наиболее мощное крепление на длине $L_{\text{пр}}$ гидравлического прыжка называют водобоем. Донная струя здесь имеет большие скорости, а вода в зоне вальца сильно насыщена возду-

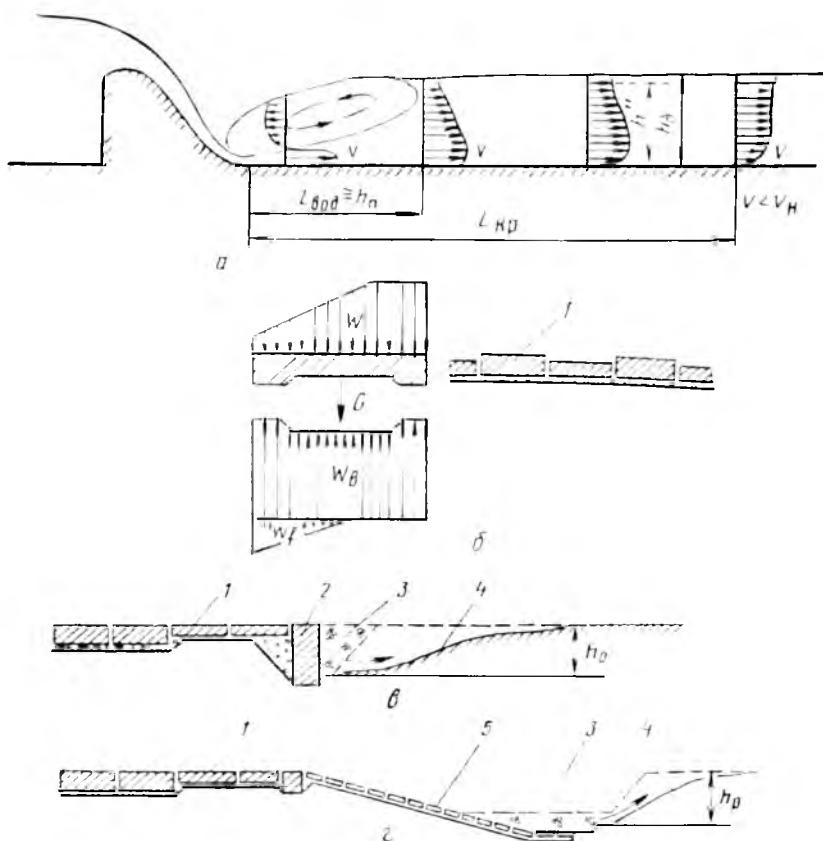


Рис. 4.42. Крепление дна в НБ водосливной плотины:

a — трансформация эпюры скоростей потока в НБ; *б* — нагрузки на водобой; *в, г* — концевые участки крепления с зубом (*в*) и ковшом (*г*); W — нагрузка от веса воды над плитой водобоя; G — вес плиты; W_B — взвешивающее давление воды; W_f — фильтрационное давление; h_p — глубина размыва за участком крепления; *1* — плита рисбермы; *2* — концевой зуб; *3* — отсыпка камня; *4* — размывы за концевым участком крепления; *5* — крепление передней стенки ковша

хом, поэтому давление W на водобой сверху относительно невелико, и вес его G должен быть значительным, чтобы противостоять действующим снизу нагрузкам W_B и W_f (см. рис. 4.42, б). Остальную часть крепления устраивают в виде рисбермы — бетонной или из каменной наброски с толщинами, уменьшающимися по мере рассеяния избыточной энергии потока, не погашенной в прыжке. Рисберму делают шероховатой для более быстрого уменьшения скоростей у дна, например, укладывая плиты с превышением одной над другой (см. рис. 4.42, в).

Для уменьшения длины $L_{кр}$ рисберму заканчивают концевым креплением и зубом, длина которого больше возможной глубины размыва h_p за ним (см. рис. 4.42, в), либо углублением — ковшом (см. рис. 4.42, г). Глубины в ковше должны обеспечивать отсутствие размыва его дна. Задняя стенка ковша и русло за ним могут размываться, что не опасно для работы сооружения.

4.9.4. ПОДЗЕМНЫЙ КОНТУР ПЛОТИН

Рассмотренные выше эффекты взаимодействия фильтрационного потока с сооружением определяют требования к подземному контуру плотины: снижение напоров фильтрационного потока с целью уменьшения фильтрационного давления на подошву сооружения; обеспечение градиентов фильтрации, безопасных для грунта основания; снижение фильтрационных потерь до допустимых пределов.

Очевидно, рациональным будет подземный контур, обеспечивающий устойчивость конструкции против сдвига и фильтрационную прочность основания при максимальной экономической эффективности сооружения.

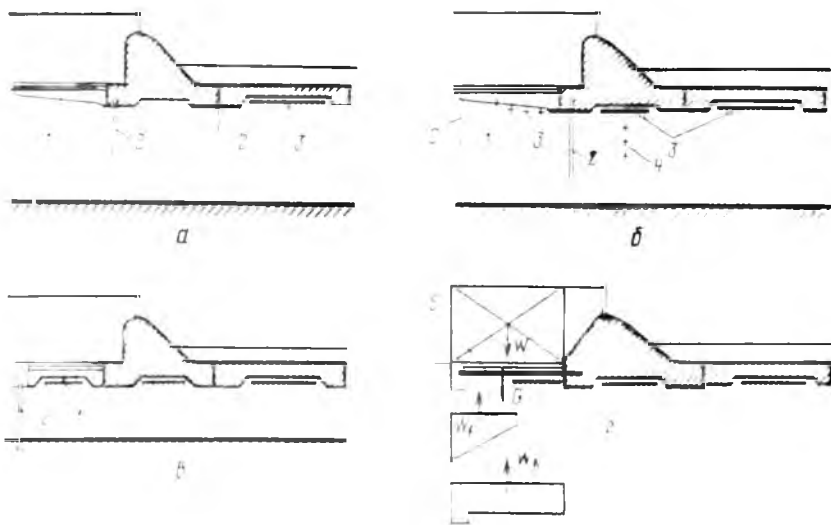


Рис. 4.43. Варианты подземного контура плотин на скальных основаниях:

а — при глубоком залегании водоупора и слабых в фильтрационном отношении грунтах; б — то же, при фильтрационно-устойчивых грунтах; в — при неглубоком залегании водоупора; г — при расположении плотины на глинистых грунтах; 1 — грунтовой понур; 2 — шпунтовые ряды; 3 — дренажи горизонтальные; 4 — дренаж вертикальный; 5 — негрунтовой анкерный понур

Схемы для различных грунтовых условий, которые могут быть положены в основу проектирования рациональных подземных контуров, приведены на рисунке 4.43. Схема *a* целесообразна при глубоком залегании водоупора и несвязных неоднородных основаниях, склонных к фильтрационным деформациям, с низкими допускаемыми градиентами. Поэтому в пределах плотины дренажи отсутствуют, путь фильтрации развит с помощью горизонтальных (понур) и вертикальных (шпунтовый ряд) элементов. Для предотвращения фильтрационных деформаций на выходе потока в дренаж перед водобоем может быть устроен короткий шпунтовый ряд.

Схема *б* предназначена для случая сильнопроницаемого основания, устойчивого к фильтрационным деформациям. Фильтрационное давление снижают здесь как развитием длины пути фильтрации (понур, шпунты), так и устройством дренажа под плотиной. Возможны также второй, понурный, шпунт и дренаж под частью понура, что почти полностью снимает фильтрационное давление на подошву плотины. При основаниях анизотропных, водопроницаемость которых в горизонтальном направлении выше, чем в вертикальном, применяют вертикальный, скважинный дренаж.

При неглубоком залегании водоупора (до 10...20 м) применяют схему *в*. В этом случае фильтрационное давление может быть снято полностью, если вертикальная преграда водонепроницаема. При шпунтовых рядах вода просачивается в зазоры между шпунтинами и перехватывается дренажами. В зависимости от проницаемости шпунта возможна схема как с понуром, так и без него.

Схема *г* характерна для малопроницаемых связных оснований, допускающих высокие значения градиентов. Понур в этом случае должен быть водонепроницаемым, из асфальтовых или полимерных материалов. Под понуром и плотиной устраивают дренаж. Такая схема наиболее целесообразна при заанкеривании арматуры железобетонной основы понура в теле плотины. К основанию понур прижимает сила $(W+G) - (W_b+W_f)$ (где W — вес воды над понуром; G — вес понура; W_b — взвешивающее давление; W_f — фильтрационное давление). Сила трения по контакту понура через арматуру передается телу водослива, удерживая его от сдвига.

4.9.5. РАЗРЕЗКА БЕТОННЫХ ПЛОТИН НА НЕСКАЛЬНЫХ ОСНОВАНИЯХ

Плотины на нескальных основаниях разрезают на секции, отделенные друг от друга температурно-осадочными швами. Если грунт основания склонен к значительным неравномерным

осадкам (глины, супеси, суглинки, пески мелко- и среднезернистые), то швы устраивают в быках; размер секции между швами 40...60 м (см. рис. 4.44, *a*).

При малодеформируемых нескальных, а также скальных основаниях возможно устройство швов вне быков — рядом с ними или по серединам пролетов. Схема с разрезкой по осям быков даже при значительных неравномерных осадках и перекосах не грозит заклиниванием затвора, как это возможно при разрезке в пролете. Однако эта схема приводит к большой толщине быков, так как шов, разрезая бык, ослабляет его, а также значительно большей, чем при разрезке в пролетах длинне швов, особенно в плотинах с низким порогом.

Кроме температурно-осадочных, в таких плотинах устраивают и температурные швы, так, чтобы расстояние между ними было 10...15 м, доводя их до фундаментной плиты. По конструкции температурные швы плотин на нескальных и скальных основаниях аналогичны, поскольку их деформации зависят только от температурных деформаций бетона. Иное дело — осадочные швы. При перекосах секций, обусловленных неравномерностью осадок основания, шов в верхней части может раскрываться на несколько сантиметров (рис. 4.44, *a*); при перекосе в другую сторону секции могут наваливаться друг на

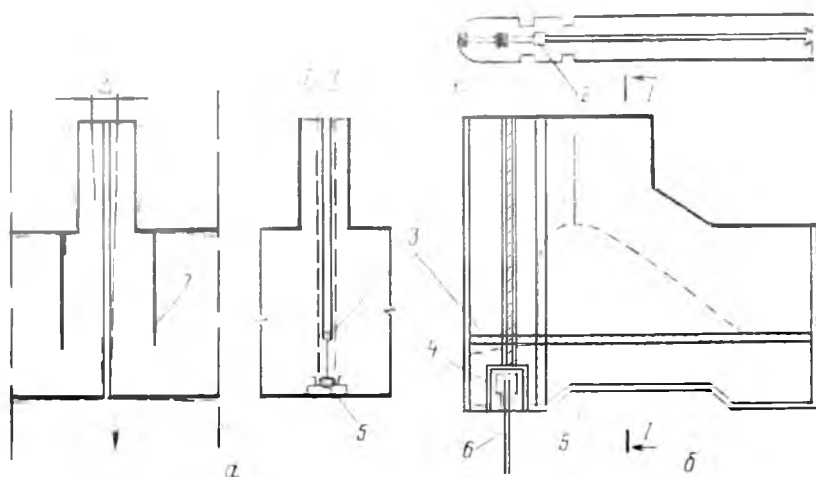


Рис. 4.44. Схема температурно-осадочного шва плотины на нескальном основании:

a — раскрытие шва (Δ) при неравномерных осадках секций; *б* — расположение уплотнений в шве; 1 — главное вертикальное уплотнение (битумная шпонка); 2 — дренажная шахта; 3 — главное горизонтальное уплотнение; 4 — внутреннее контурное уплотнение; 5 — донное горизонтальное уплотнение; 6 — шпунтовый ряд; 7 — температурный шов

друга. Поэтому швы в быках имеют значительную ширину (до 10...20 см) в верхней части, и для уплотнения их требуются асфальтовые шпонки крупного сечения, способные работать при больших деформациях шва. Обычно это колодец сечением 60×60 см и более, изолированный от полости шва и заполненный пластичной битумной мастикой. Схема расположения уплотнений в осадочном шве плотины показана на рисунке 4.44, б. Со стороны ВБ и НБ шов перекрывают герметизирующим контурным уплотнением, выше уровня воды по контуру устраивают крышки против попадания мусора в полость шва. Со стороны основания по контуру выполняют горизонтальную шпонку из металлического листа с битумной обмазкой: на уровне верха фундаментной плиты, при переходе от узкой нижней части шва к широкой, делают главное горизонтальное уплотнение. Смыкаясь между собой, вертикальные и горизонтальные шпонки создают замкнутый контур уплотнения, не позволяющий фильтрационному потоку проникать в полость шва.

4.10. СОПРЯЖЕНИЕ БЕТОННЫХ ПЛОТИН С БЕРЕГАМИ И ГРУНТОВЫМИ ПЛОТИНАМИ

Берега, на которые плотина передает значительные нагрузки через свои береговые секции, а арочная — и всю нагрузку от воды ВБ, достигающую миллионов тонн, должны обладать высокой несущей способностью. В то же время характерной особенностью береговых склонов является их малая устойчивость, близкая к предельной: на берегах образуются неустойчивые осыпи, легко приходящие в движение, трещины в бортах, параллельные руслу и могущие послужить причиной обвала берега, и др. Понятно, что абсолютные значения сил, необходимых для нарушения природного равновесия, велики. Однако они вполне соизмеримы с нагрузками от гидростатического и фильтрационного давления воды, возникающими при возведении плотин, особенно крупных.

Изменения природных условий в береговом склоне после создания водохранилища хорошо видны на рисунке 4.45:

подъем уровня воды в ВБ, что приводит к обводнению потенциально неустойчивых участков I склона и возможному их обрушению;

передача значительных нагрузок от гидростатического давления W и веса береговых секций на склоны берегов;

обрушение берега, которому способствует фильтрационный поток, распространяясь из ВБ в НБ, обводняя береговые склоны за плотиной и создавая дополнительные фильтрационные силы W_f .

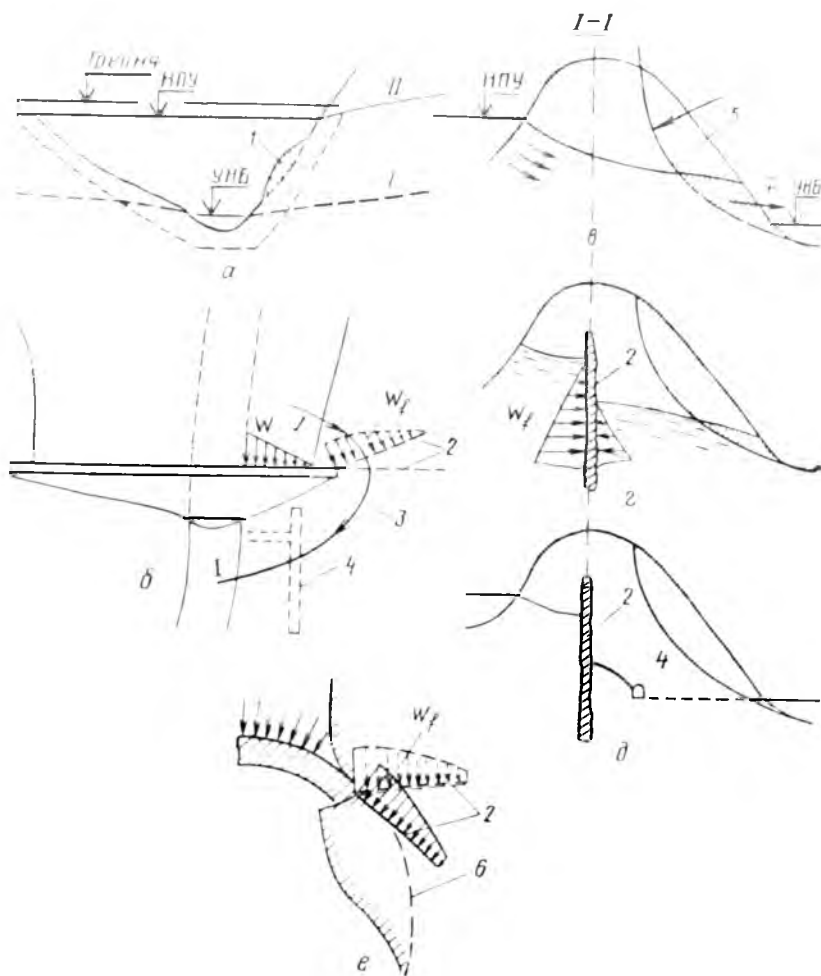


Рис. 4.45. Влияние создания водохранилища на условия работы береговых склонов:

а — разрез по оси плотины; *б* — план плотины; *в*, *г*, *д* — влияние фильтрационного потока и противифльтрационных устройств на устойчивость берега; *е* — влияние положения противифльтрационной завесы на устойчивость берегового упора арочной плотины; *1* — положение поверхности грунтовых вод в НБ; *1/1* — то же — в ВБ; *1* — потенциально-нестойчивый участок склона; *2* — цементационная завеса; *3* — направление фильтрационного потока; *4* — береговой дренаж; *5* — кривая обрушения берегового откоса; *6* — граница упорного массива; *W* — гидростатическая нагрузка; *W_φ* — давление на завесу; *φ* — фильтрационная сила

Последнее весьма опасно для устойчивости береговых склонов, сложенных как нескальными, так и скальными породами. Поэтому для уменьшения его вредного влияния противофильтрационные устройства плотины (завесы в скале, шпунтовые ряды и т. д.) продолжают в борта на расстояние 0,5...1,5 напора, снижая тем самым фильтрационные градиенты и уровень кривой депрессии за плотиной (см. рис. 4.45, *г*). Заметим, что завеса, создавая подпор фильтрационного потока, воспринимает значительную нагрузку от воды (эпюры W_f на рис. 4.45, *б, г*) и передает ее береговому склону в дополнение к сдвигающей нагрузке от плотины. Варьируя положение завесы 2 в плане, можно направить силу фильтрационного давления вглубь берегового массива, что особенно важно для арочных плотин (см. рис. 4.45, *е*).

На небольших плотинах русловую и береговую части завесы устраивают из цементационной галереи в теле плотины: при необходимости глубокой цементации скважины бурят из штолен, проложенных в скальных берегах ущелья. После завершения цементационных работ штольни заполняют бетоном.

Дренаж основания под плотиной также заводят в берега, что позволяет дополнительно снизить кривую депрессии и практически полностью осушить береговой склон (см. рис. 4.45, *д*). В крупных объектах делают дополнительные дренажи в виде штолен, параллельных склону (рис. 4.45, *б, д*), из которых веерообразно бурят дренажные скважины вглубь массива. При нескальных основаниях береговой дренаж выполняют в виде ряда дренажных скважин, параллельного руслу. Бетонные водосливные плотины с берегами или глухими грунтовыми плотинами сопрягают с помощью устоев 12 (см. рис. 4.41), представляющих собой подпорную стенку, параллельную потоку с открылками в ВБ и НБ или без них.

На контакте грунта с бетоном возможно возникновение фильтрационных деформаций даже при относительно небольших градиентах напора, так как из-за разности осадок устоя и грунта здесь появляются трещины и даже пути сквозной фильтрации. Для того чтобы обеспечить надежную работу конструкции, сооружают незатопленные открылки в ВБ, удлиняющие путь контактной фильтрации и снижающие градиенты (см. пункт 15 на рис. 4.41). При отсутствии верховых открылков устраивают водонепроницаемые диафрагмы — шпоры 15, плотно примыкающие к устою. Часть устоя в зоне водобоя обычно дренируют, выполняя за устоем на уровне бытовых отметок НБ трубчатый или ленточный дренаж, подобный дренажам грунтовых плотин.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Какие достоинства бетонных плотин делают их конкурентоспособными с другими плотинами из грунтовых материалов?
2. Зачем нужны противифльтрационные и дренирующие устройства в основании бетонной плотины?
3. Какова роль дренажей в теле бетонной плотины?
4. Почему нельзя построить бетонную плотину без швов? Каково назначение конструктивных и строительных швов?
5. Каковы основные направления удешевления бетонных плотин?
6. Чем достигается обеспечение устойчивости контрфорсных плотин? Какие типы контрфорсных плотин Вы знаете?
7. Почему арочная плотина, значительно менее массивная, чем гравитационная и даже контрфорсная, не сдвигается под давлением воды?
8. Каковы достоинства и недостатки поверхностных и глубинных водосбросов?
9. Какие режимы сопряжения потока, проходящего через водосброс с нижним бьефом, Вы знаете? В чем достоинства и недостатки этих режимов?
10. Какие факторы взаимодействия потока с сооружением влияют на долговечность и надежность водосбросов плотин?
11. Перечислите основные элементы водосливной плотины на скальном основании. Каково их назначение?
12. Что такое рациональный подземный контур плотины?

Глава 5. ВОДОПРОПУСКНЫЕ СООРУЖЕНИЯ ГИДРОУЗЛОВ С ГЛУХИМИ ПЛОТИНАМИ

5.1. ОСНОВНЫЕ ТИПЫ СООРУЖЕНИЙ И УСЛОВИЯ ИХ ПРИМЕНЕНИЯ

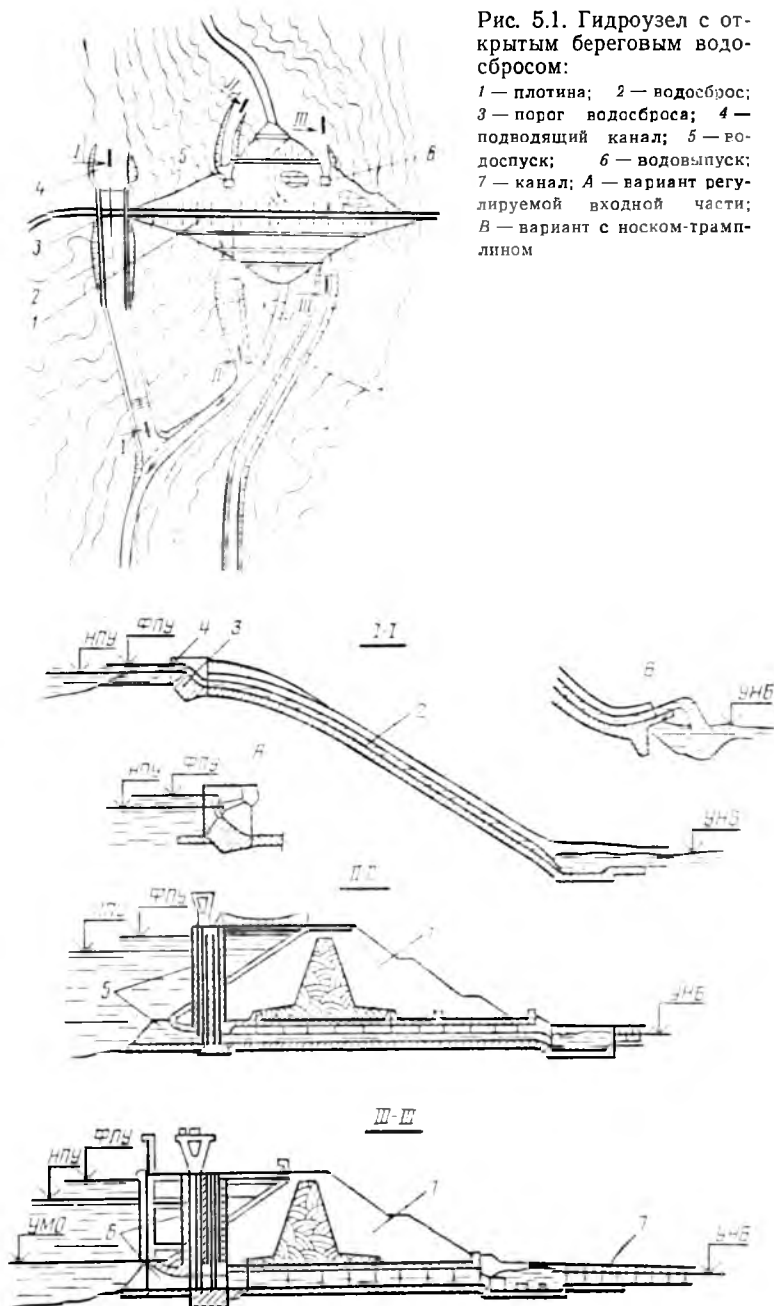
Кроме глухой плотины из грунтовых или других материалов в состав гидроузла входят, как минимум, два сооружения: водосброс и водовыпуск.

Водосброс. Он служит для пропуска в НБ гидроузла паводковых расходов и может быть различного типа. В частности, по расположению относительно плотины, перекрывающей русло, водосбросы различают: расположенные в теле плотины, вне тела плотины на одном из берегов (береговые) или на пойме (пойменные); последний прорезает тело плотины.

Если водосброс располагают в теле глухой грунтовой или каменно-набросной плотины, то он представляет собой трубчатую конструкцию, лежащую своим основанием на материковом грунте, засыпанную сверху и с боков грунтом тела плотины. Со стороны верхнего откоса труба сопрягается водоприемником в виде башни или другой конструкции, со стороны низового откоса имеются водобойная часть и рисберма, сопрягающая трубу с руслом реки (рис. 5.1).

Рис. 5.1. Гидроузел с открытым береговым водосбросом:

1 — плотина; 2 — водосброс; 3 — порог водосброса; 4 — подводящий канал; 5 — родопуск; 6 — водовыпуск; 7 — канал; А — вариант регулируемой входной части; В — вариант с носком-трамплином



Водосброс в теле плотины может быть принят только при соответствующем технико-экономическом обосновании, то есть когда он оказывается предпочтительнее берегового. Это может быть при недостаточной устойчивости грунтов бортов (берегов) речной долины или когда паводковый эксплуатационный водосброс используют в период строительства для сброса расходов.

Береговые водосбросы целесообразно применять при наличии благоприятных топографических и геологических условий для размещения сооружений водосброса на одном из берегов (склонов) речной долины, когда сбросные расходы относительно невелики и гидроузел низконапорный. Для гидроузлов среднего и высокого напоров береговые водосбросы целесообразны, если вариант в теле плотины не проходит в плане обеспечения его высокой конструктивной и эксплуатационной надежности. Например, в узких створах (каньонах), сложенных скальными породами, где пропуск строительных расходов можно обеспечить туннелями, размещенными в толще берега, а водосброс строительного периода полностью или частично преобразуется в эксплуатационный. Могут быть и другие компоновки гидроузлов в стесненных створах при узком фронте строительных работ, когда целесообразнее и экономичнее строительство берегового водосброса.

На низко- и средненапорных гидроузлах в широких створах, когда можно паводковый расход (или его часть) пропустить в обход гидроузла по пойме, делают нерегулируемые или частично регулируемые резервные пойменные водосбросы. Тип водосброса, как указывалось ранее, выбирают на основе технико-экономического сравнения различных вариантов.

Для гидроузлов с глухими плотинами можно привести основные типы водосбросов:

открытые — с транзитной частью в виде быстротока или многоступенчатого перепада (см. рис. 5.1);

закрытые — трубчатые, туннельные (рис. 5.2);

комбинированные, имеющие признаки как открытых, так и закрытых.

По конструкции входной (головной) части открытые водосбросы различают на *фронтальные*, или с лобовым подводом воды, *траншейные*, или с боковым подводом воды, *полигональные* и др.

Закрытые водосбросы бывают *шахтные*, *трубчато-ковшовые*, *туннельные*, *башенные* и др.

По условиям управления водосбросы подразделяют на *регулируемые*, в которых пропуск соответствующего расхода обеспечивается открытием отверстия, перекрываемого затворами, и *нерегулируемые*, которые включаются в работу, как толь-

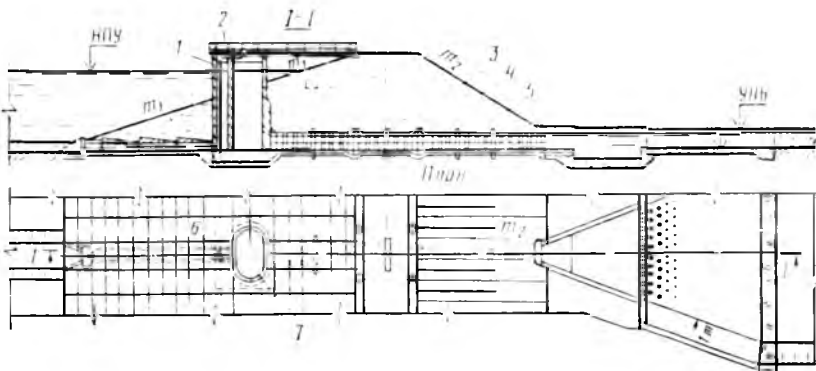


Рис. 5.2. Трубчатый башенный водосброс в плотине малого напора:

1 — соросудерживающая решетка; 2 — подъемник; 3 — железобетонная диафрагма; 4 — температурно-осадочный шов; 5 — труба; 6 — камера затворная; 7 — шахта (башня)

ко уровень воды в водохранилище превысит отметку порога водосброса.

Водовыпуск. Он служит для подачи воды из водохранилища в канал или трубопровод и далее в оросительную сеть, либо для других хозяйственных целей или для полезных попусков — в русло реки ниже гидроузла. Подача воды из водохранилища для потребителя должна обеспечиваться даже при самом низком уровне воды в водохранилище (УМО). В некоторых случаях может быть несколько водовыпусков различного назначения. Может быть еще водоспуск (аварийный водовыпуск) для полного или частичного опорожнения водохранилища. Водовыпуск располагают чаще всего в теле плотины, его основание — это коренной грунт.

Тип водовыпуска зависит от величины строительных расходов и способов их пропуска, от водохозяйственных показателей объекта (расход, график водопотребления и т. д.), топографических и геологических условий створа узла и результатов технико-экономического сравнения вариантов сооружений.

При небольших (от НПУ до УМО) до 5...6 м (призма сработки) колебаниях уровня в водохранилище водовыпуск может быть выполнен либо в виде открытого, либо диафрагмового шлюза-регулятора на одном из берегов водохранилища, то есть вне тела плотины. Это *открытый* тип водовыпуска.

В большинстве случаев принимают *закрытые* водовыпуски, когда величины сработки уровня в водохранилище больше 6 м. Имеются водовыпуски, работающие в *напорную* гидравлическую систему (ГЭС, насосную станцию) или в *безнапорную*

(открытую или закрытую) гидравлическую систему, например в магистральный канал.

Водовыпуски по конструкции делят на *трубчатые, туннельные и комбинированные*, сочетающие признаки обоих типов. Водовыпуски различают также и по местоположению затворов: в начале, в средней части и в конце водопропускного тракта.

Каждый из типов имеет свои особенности и область применения.

5.2. БЕРЕГОВЫЕ ОТКРЫТЫЕ ВОДОСБРОСЫ

5.2.1. ВОДОСБРОСЫ С ЛОБОВЫМ ПОДВОДОМ ВОДЫ (ФРОНТАЛЬНЫЕ)

Сооружения этого типа возводят в составе гидроузлов как с плотинами из грунтовых материалов, так и другими типами глухих плотин (например, арочными, контрфорсными). В основном водосброс размещают на одном берегу, на двух — лишь в особых случаях, когда сбрасываемые расходы значительны и по геологическим, топографическим условиям и условиям компоновки гидроузла. Расходы таких водосбросов составляют для небольших и малонапорных гидроузлов десятки кубических метров в секунду, средне- и высоконапорных — от 500 до 12 000 м³/с. Береговой водосброс в общем случае состоит: из подводящего канала, водослива фронтального типа или шлюза-регулятора для включения в работу и выключения, отводящего промежуточного канала, сопрягающего сооружения (быстро-тока, быстротока с консолью-трамплином, многоступенчатого перепада), конечного участка (рис. 5.3). Для конкретных топографических условий может не быть отводящего промежуточного канала или конечного участка также в виде канала.

Подводящий канал обеспечивает плавный подвод потока к водосливу. В зависимости от рельефа в плане он может быть криволинейного или прямолинейного очертания и переменной ширины по длине, сужаясь на подходе к водосливу. Уклон дна принимают нулевым на значительных глубинах, обратный — при малых. Если трасса водосброса проходит в скальных породах, то откосы и дно не укрепляют. Для нескальных пород дно и откосы покрывают защитной одеждой на участке примыкания канала к водосливу, то есть в зоне, где скорости потока выше допускаемых для имеющихся нескальных грунтов. Заложение откосов трапециoidalного сечения канала принимают 1,5...2,5 для нескальных грунтов, 0,5 — для скальных.

Водосливная часть представляет собой водослив практического профиля (реже) или с невысоким порогом; в плане он может быть прямолинейного, криволинейного или более сложного (например, зигзагообразного) очертания. Тип водослива

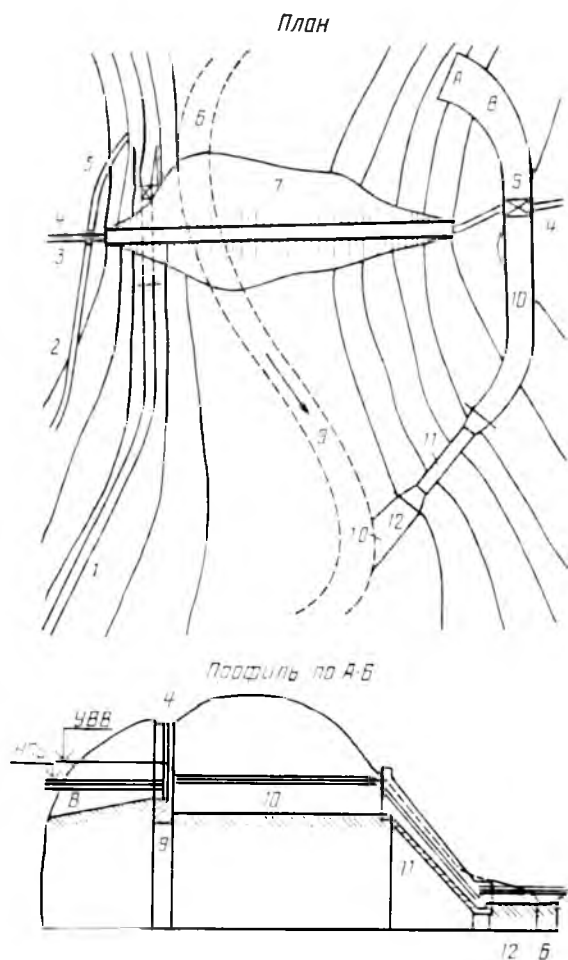


Рис. 5.3. Схема гидроузла с грунтовой плотиной и открытым береговым водосбросом и водовыпуском:

1 — канал; 2 — лиманный канал; 3 — регулятор лиманного канала; 4 — дорога; 5 — водозаборное сооружение; 6 — река; 7 — плотина; 8 — подводящий канал водосброса; 9 — сбросной регулятор; 10 — канал сбросной; 11 — сопрягающее сопряжение; 12 — отводящий канал

зависит от сбрасываемого расхода, рельефа трассы и ширины сопрягающего сооружения. При фронтальном прямолинейном водосливе на его пороге (гребне) для уменьшения ширины водослива и его высоты могут быть установлены затворы, тогда водосброс уже не самовключающийся, а управляемый. В гидроузлах с плотинами малых напоров в качестве водосливной

части может быть принят шлюз-регулятор с затворами, рассчитанными на напор не более 3...3,5 м, работающий как донный водослив с широким порогом. Если за водосливной частью по трассе водосброса делают сопрягающее сооружение, то никакого гашения энергии потока за водосливом не предусматривают. Когда за водосливом или шлюзом-регулятором предусматривают отводящий промежуточный канал, необходима и водобойная часть, обеспечивающая сопряжение сооружения с каналом.

Отводящий промежуточный канал — это канал с укрепленным или неукрепленным руслом в зависимости от скорости потока в нем и грунтов, в которых он проходит. Его длина (как и необходимость его возведения вообще) определяется рельефом трассы водосброса. Предназначен он для выравнивания потока и плавного подвода его к сопрягающему сооружению. Уклон канала принимают по гидравлическому расчету. В необходимых случаях дно и откосы укрепляют. Дополнительное положительное значение его заключается еще и в том, что он находится на верхнем участке трассы водосброса. При его разработке целесообразно использовать грунт выемки для отсыпки тела плотины.

Сопрягающее сооружение — быстроток применяют на береговых открытых водосбросах довольно часто. Это по существу канал, выполненный в бетонном или железобетонном русле с уклоном более критического (см. рис. 3.15). Наиболее распространены уклоны быстроток 0,05...0,25 и более (если делают в скальных грунтах). Быстроток может быть постоянной или переменной (сужающийся или расширяющийся) ширины, это диктуется как условиями гашения энергии в НБ, так и необходимостью некоторого сокращения объемов работ. В плане быстроток обычно прямолинейный, криволинейную в плане ось быстроток назначают крайне редко при относительно небольших расходах. На повороте поперечное сечение лотка делают с учетом деформации струи под действием центробежных сил. Поперечное сечение быстроток может быть прямоугольное, трапецидальное, полигональное. Боковые стенки лотка — подпорные стенки того или иного очертания; дно — бетонная или железобетонная плита толщиной 0,5...0,25 м, отрезанная от стенок деформационным швом. При небольших размерах поперечных сечений быстроток (а также при слабых грунтах основания с неравномерными осадками) боковые стенки и днище могут быть выполнены в виде монолитной коробчатой конструкции докового типа. Поперечные деформационные швы делают через 15...25 м.

В широких быстротках, на криволинейных участках в лотках также делают продольные отдельные стенки для обеспе-

чения устойчивости потока в поперечном направлении. Возможны безволновые формы поперечного сечения быстротока.

Дренаж под дном быстротока и за стенками предусматривают при высоком положении депрессионной поверхности фильтрационного потока по его трассе.

Быстроток с отводящим каналом или руслом реки в условиях нескальных грунтов сопрягают в виде водобойного колодца или водобоя с водобойной стенкой, а также участка рисбермы. На скальных грунтах в конце быстротока целесообразно устраивать носок-трамплин с сосредоточенной струей или рассеивающий. В малых водосбросах концевая часть быстротока может быть в виде лотка-консоли на опорах.

Гидравлические расчеты быстротока выполняют по соответствующим рекомендациям с учетом аэрированного потока с большими скоростями, необходимости защиты оснований сооружений от размыва, а обтекаемых элементов — от кавитационной эрозии.

Многоступенчатые перепады применяют при наличии больших уклонов ($i \geq 0,25$) на трассе водосброса, когда использование быстротока затруднено. Удельные расходы на перепаде относительно невелики, то есть $q \leq 15 \text{ м}^3/\text{с}$ в силу специфического характера их работы. Сооружение состоит из ряда ступеней высотой 4...6 м, выполненных в виде колодцев, образованных боковыми продольными и поперечными стенками (см. рис. 3.16). Длина ступени составляет не менее двух-трех ее высот, то есть 12...18 м. Размеры колодца и высоту его водобойной стенки принимают по гидравлическому расчету. Иногда дно колодца имеет небольшой обратный уклон, чаще — оно горизонтальное. Водобойные плиты ступеней на нескальных или полускальных основаниях отделены вертикальным швом с уплотнением от боковых стен для обеспечения независимой осадки. Швы оборудованы противофильтрационными устройствами.

В скальных породах конструкция перепада проще, водобойные плиты там иногда можно не делать, заменяя их выравнивающей облицовкой толщиной 0,3...0,4 м.

Конструктивные размеры водобойной плиты ступени перепада боковых стен принимают согласно расчету на устойчивость.

5.2.2. ВОДОСБРОСЫ С БОКОВЫМ ПОДВОДОМ ВОДЫ (ТРАНШЕЙНЫЕ)

Водосброс состоит из следующих сооружений: водослива с широким порогом или практического профиля; траншеи, в которую поступает вода через водослив; отводящего канала; со-

План

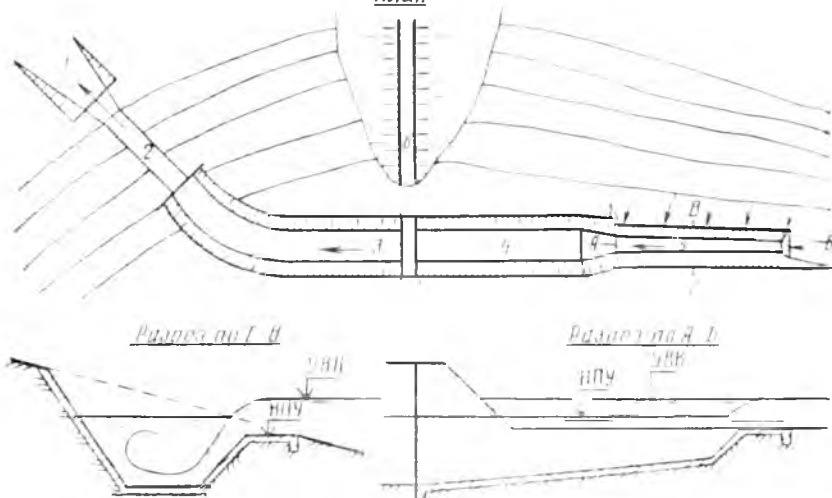


Рис. 54. Схема траншейного водосброса:

1 — отводящий канал; 2 — сопрягающее сооружение; 3 — мост; 4 — сбросной канал; 5 — траншея; 6 — плотина

прягающего сооружения (быстроток или перепад); концевой участка (рис. 54). Траншея может переходить в воронку шахты, и тогда это уже будет траншейно-шахтный водосброс (см. ниже). Водослив траншейного водосброса может быть с затворами на гребне (управляемый) или без затворов с отметкой порога на НПУ.

Водосливы с затворами могут иметь при напоре на гребне до 8 м пропускную способность до 8000 м³/с, а без затворов — напор до 2 м, а пропускную способность до 600 м³/с. Водосливы располагают вдоль одного из берегов склонов траншеи.

Водослив без затворов, то есть автоматического действия, представляет собою или плоский флютбет (водослив с широким порогом), или водослив практического профиля, часто вакуумного типа.

Траншея — это канал с изменяющейся по длине шириной и глубиной. Стенки траншеи имеют крутой откос 1:0,5, ибо траншеи часто располагают в скальных или полускальных грунтах в ущельях с крутыми склонами, когда применение фронтального водосброса затруднено. Иногда траншею в период строительства гидроузла используют для пропуска строительных расходов, тогда ее располагают на низких отметках.

В траншее протекание потока имеет сложную форму: переменную массу по длине и образование винтового движения.

Гидравлический расчет заключается в определении длины водослива, а следовательно, и траншеи и расчете режима в самой траншее, например, методом конечных разностей. Окончательные размеры траншеи принимают по данным модельных исследований, которые необходимы в первую очередь для крупных водосбросов. Поперечное сечение траншеи покрывают заанкеренной в скалу бетонной облицовкой — плитами по дну и откосам, для устранения винтового движения предусматривают различные конструктивные мероприятия, в конце траншеи сооружают распределительную стенку или прорезной порог — с целью обеспечения более равномерного выхода потока из нее.

Остальные элементы (канал, сопрягающее сооружение и др.) траншейного водосброса проектируют и строят так же, как и для водосбросов с лобовым подводом потока.

5.3. ЗАКРЫТЫЕ БЕРЕГОВЫЕ ВОДОСБРОСЫ

Закрытые водосбросы распространены в составе средне- и высоконапорных гидроузлов в стесненных скальных створах.

При этом появляется возможность иметь широкий фронт работ по возведению глухой плотины (грунтовой или бетонной), так как строительные расходы пропускают по подземным туннельным и трубчатым водоводам. Снижение стоимости в этом случае имеет место за счет замены дорогого для этих условий берегового водосброса более дешевым закрытым.

5.3.1. ТРУБЧАТЫЕ БАШЕННЫЕ ВОДОСБРОСЫ

Этот водосброс условно отнесен к береговым. В отдельных случаях закрытые водосбросы размещают непосредственно в теле глухих плотин из грунтовых материалов, это трубчатые башенные водосбросы. Простейший тип такого водосброса для напоров в несколько метров и для небольших расходов представлен на рисунке 5.2. Это башня в виде стакана, в которую вода поступает, переливаясь через ее кромку. Далее труба, соединенная с башней, транспортирует поток в НБ. В период строительства водосброс с недостроенной башней используют для пропуска строительных расходов, для чего со стороны ВБ к башне обеспечен подвод воды через трубу из подводящего канала. Благодаря этому такое сооружение может сочетать в себе функции водосброса и водовыпуска. Строят башенные водосбросы и для пропуска больших расходов при больших напорах. Важное значение для работы трубчатых башенных водосбросов имеет обеспечение надежного уплотнения в деформационных швах как между секциями труб, так и между трубами и башней с учетом возможных неравномерных осадок.

Недопущение образования сосредоточенного фильтрационного потока вдоль контакта железобетонных труб с грунтом основания и насыпным грунтом тела плотины — также важное условие нормальной работы сооружения.

5.3.2. ТРУБЧАТЫЕ КОВШОВЫЕ ВОДОСБРОСЫ

Эти береговые водосбросы состоят из оголовка в виде ковша, трубопровода в одну или несколько ниток и выходного участка в виде или носка-трамплина, или водобойного колодца, соединенного с отводящим каналом, выходящим в русло реки. Водослив оголовка может быть вакуумным или безвакуумным, отметку его гребня принимают на уровне НПУ. Режим в трубах проектируют напорным или безнапорным. Пример трубчатого ковшового водосброса показан на рисунке 5.5. Такие сооружения в нашей стране нашли широкое применение в качестве водосбросов небольших водохранилищ и прудов с расходами 20...30 м³/с в Нечерноземной зоне РСФСР.

5.3.3. СИФОННЫЕ ВОДОСБРОСЫ

Это один из видов трубчатых водосбросов автоматического действия, располагаемых в теле плотины (рис. 5.6). Сифон представляет собою систему труб прямоугольного поперечного сечения, изогнутых в вертикальной плоскости, проложенных в теле бетонной или грунтовой плотины (см. рис. 5.6, а). Для относительно невысоких напоров и расходов при гидроузлах с грунтовыми плотинами используют сифонные водосбросы из стальных труб круглого поперечного сечения (см. рис. 5.6, в). Такие водосбросы распространены в областях Нечерноземной зоны РСФСР. Сифон включается в работу всем поперечным

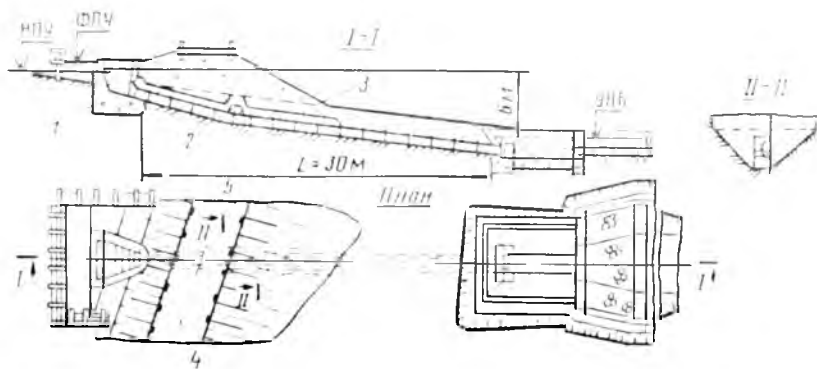


Рис. 5.5. Трубчатый ковшовый водосброс:

1 — ковш; 2 — труба; 3 — плотина; 4 — ось гребня; 5 — тумбы

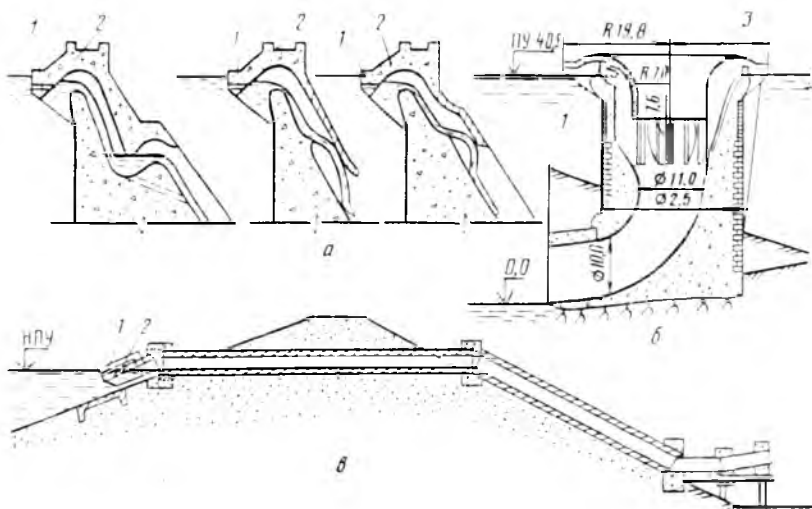


Рис. 5.6. Сифонные водосбросы:

а — в теле бетонной плотины; *б* — башенный сифонный гидроузел Бадант-Падант (Малайзия); *в* — в теле грунтовой плотины; 1 — отверстия воздушные; 2 — козырек; 3 — разрез по оси отверстия (размеры в м)

сечением при повышении уровня ВБ на 20...30 см, при полном исключении попадания воздуха в его полость через входное отверстие. Этого достигают погружением под уровень ВБ козырька сифона, воздух со стороны НБ в область вакуума не допускают, сооружая различные устройства в трубе (дополнительное колено, носок-трамплин и др., см. рис. 5.6, *а*). За счет образования вакуума в сифоне он обладает повышенной пропускной способностью.

Из работы сифон выключается самопроизвольно, когда уровень ВБ достигнет отметки НПУ и обнажатся воздухопроводящие отверстия.

5.3.4. ШАХТНЫЕ ВОДОСБРОСЫ

Шахтный водосброс применяют в средне- и высоконапорных гидроузлах в скальных ущельях (долинах). Он состоит из поверхностного кольцевого или другого типа водослива, вертикальной или слегка наклонной шахты и водоотводящего тракта — туннеля (рис. 5.7).

Шахту проектируют круглого поперечного сечения, туннель за коленом шахты имеет поперечное сечение, чаще не круглое, а прямоугольное или какое-либо другое, так как в туннеле обычно принимают безнапорный режим движения потока, что лучше в целях эксплуатации.

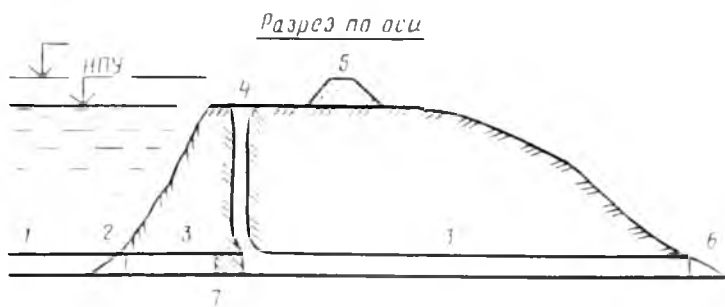


Рис. 5.7. Схематичный разрез по оси шахтного водосброса:

1 — перемычка; 2 — входной портал строительного туннеля; 3 — туннель; 4 — шахта; 5 — плотина; 6 — выходной портал; 7 — пробка

При назначении отметки гребня кольцевого (иногда лепесткового) водослива для развития длины водосливного фронта на уровне отметки НПУ водосброс работает как автоматический, в этом случае напор на гребне водослива обычно не превышает 2 м и расходы водосброса невелики.

Если на гребне устанавливают затворы с напором на них не более 5...6 м, то это — управляемый шахтный водосброс, его расход уже превышает 600...700 м³/с и может достигать 5000 м³/с и более.

Радиус воронки кольцевого водослива, размеры лепесткового водослива зависят от величины сбрасываемого расхода. Конусную переходную часть вертикальной шахты рассчитывают по уравнению свободного падения точки под действием собственного веса.

Горизонтальный туннель шахтного водосброса в период строительства, как правило, используют для пропуска строительных расходов. После строительства шахты участок туннеля, соединяющий его с руслом ВБ гидроузла, закрывают бетонной пробкой, как это видно на рисунке 5.7.

Туннель водосброса шахтного типа проектируют по рекомендациям, относящимся к туннелям вообще, независимо от их назначения. Здесь обычно на входном участке (то есть за вертикальной шахтой) при безнапорном режиме предусматривают подачу воздуха, напорный режим проектируют редко.

5.3.5. ТУННЕЛЬНЫЕ ВОДОСБРОСЫ

Их широко используют при строительстве средне- и высоконапорных гидроузлов, располагающихся в узких скальных створах, там, где, например, затруднено строительство шахт-

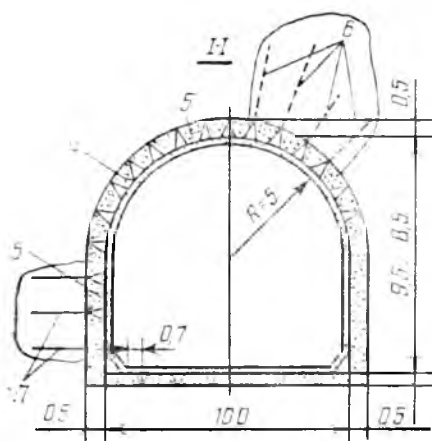
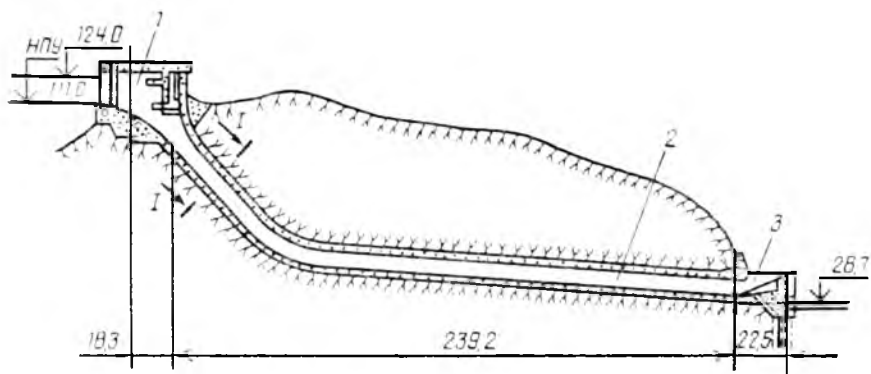


Рис. 5.8. Безнапорный туннель-
ный водосброс:

1 — входной оголовок; 2 — туннель;
3 — конечный участок; 4 — обделка;
5 — арматура; 6 — анкеры временного
крепления; 7 — анкеры постоянной
обделки (размеры в м)

ного или другого типа водосброса. Целесообразность применения в том или ином конкретном случае зависит от целого комплекса факторов и решается на основе технико-экономического сравнения вариантов.

Туннельный водосброс состоит из водоприемника и туннеля, выполняющего роль водоотводного тракта. Эти водосбросы по высотному положению водоприемника различают на два типа: водосбросы с поверхностным водоприемником (рис. 5.8), которые предназначены только для пропуска эксплуатационных расходов, и водосбросы с глубинным водоприемником, используемые одновременно как водоспуски для опорожнения водохранилища или пусков в НБ.

На особо крутых склонах устраивают туннельный водосброс с головной частью в виде траншеи.

Головная часть туннельного водосброса с поверхностным

водоприемником представляет собою водослив практического профиля или с широким порогом, перекрываемым плоским или сегментным затвором, напор на затворе может достигать 20 м и более, расположение водоприемников — многоярусное. При поверхностном водоприемнике (особенно фронтального типа) в туннелях проектируют безнапорный режим по всей длине. В водосбросах с глубинным водоприемником режим может быть как напорный, так и безнапорный, что зависит от местоположения регулирующих затворов; при положении затворов в начальной части туннеля напорный режим поток будет иметь до затворов, большая часть туннеля работает в безнапорном режиме. Здесь необходимо предусматривать мероприятия по борьбе с кавитацией, так как скорости потока на безнапорном участке туннеля очень большие.

5.4. ВОДОВЫПУСКИ

Как и все практически сооружения, типы и конструкции водовыпусков в гидроузлах с плотинами из грунтовых материалов определяются топографическими и геологическими условиями и величиной пропускаемых расходов. По расположению в узле водовыпуски (как и водосбросы) можно разделить на два типа: в теле плотины и береговые. К водовыпускам в теле плотины относятся трубчатые, к береговым — туннельные и открытые.

5.4.1. ТРУБЧАТЫЕ ВОДОВЫПУСКИ

Трубчатые водовыпуски широко используют в гидроузлах с грунтовыми плотинами малого и среднего напора, они бывают двух типов — безбашенные и башенные (рис. 5.9).

Башенные водовыпуски по местоположению относительно башни управления с затворами могут быть: с выдвинутой башней в зону подошвы верхового откоса; с башней, находящейся в средней части верхового откоса; с башней, находящейся или у гребня плотины, или со стороны низового откоса.

Каждое расположение имеет и достоинства и недостатки. Чем дальше расположена башня от основания верхового откоса, тем большая часть трубчатого водовыпуска работает в напорном режиме.

Трубы могут быть металлические или железобетонные; металлические, как правило, предусматривают для работы в напорном режиме. Наиболее рациональный режим работы транзитной части (трубчатой) — безнапорный, при нем исключено возникновение неблагоприятных переходных гидравлических режимов, когда металлические трубы уложены в железобетон-

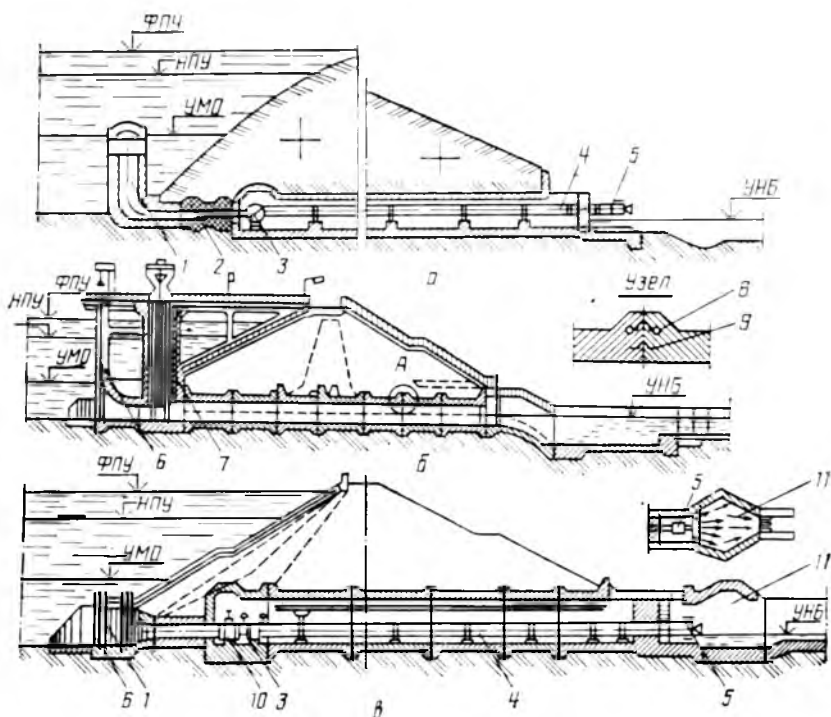


Рис. 5.9. Закрытые трубчатые водовыпуски:

а, в — туннельный водовыпуск со стальным трубопроводом в штольне; *б* — трубчатый башенный водовыпуск; *1* — башня, затопленный оголсовок; *2* — пробка; *3* — затвор; *4* — трубопровод; *5* — конусный затвор; *6* — пазы для решеток; *7* — воздуховод; *8* — резиновое уплотнение; *9* — металлический лист уплотнения; *10* — задвижка; *11* — камера гашения

ную галерею (см. рис. 5.9, *а*). Это тоже имеет свои преимущества, в период строительства галерея может быть использована для пропуска строительных расходов, а в эксплуатационный период она удобна для ревизии работы трубопроводов и их ремонта.

Выходную часть трубчатых водовыпусков на основаниях из нескальных грунтов выполняют в виде водобойного колодца и переходного участка от галереи к трапецеидальному каналу, на скальных грунтах ограничиваются отбросом струи с носка-трамплина.

5.4.2. ТУННЕЛЬНЫЕ ВОДОВЫПУСКИ

Их возводят при наличии скального относительно прочного грунта по их трассе. Ось трассы, как и для трубчатых водовыпусков, стараются принять прямолинейной. Водовыпуски могут

быть безбашенными и башенными, напорными и безнапорными, требования здесь по сравнению с трубчатыми водовыпусками к режиму потока менее категоричны. Они также могут совмещать функции строительных водосбросов и эксплуатационных водовыпусков. Затворами управляют при работе водовыпусков или из башни, или из вертикальной шахты, пробитой в породе, или из специальной камеры, выполненной в туннеле.

Гидравлические расчеты водовыпусков проводят на пропуск расчетных расходов строительного периода и периода эксплуатации по соответствующим формулам в зависимости от расчетного режима работы.

Фильтрационные расчеты выполняют для определения гидростатического давления воды на трубы, галереи, облицовки туннелей, градиентов фильтрационного потока вдоль труб, наиболее опасных в плане возникновения течения по внешнему контуру трубы, и оценки принятых мероприятий по дренированию фильтрационного потока.

Статические расчеты осуществляют на самое неблагоприятное сочетание сил и нагрузок с целью проверки принятых толщин труб, облицовок туннелей, плит, стенок и сводов галерей.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ

1. Перечислите основные типы водопропускных сооружений гидроузлов с глухими плотинами и укажите их назначение.
2. Расскажите о береговых открытых водосбросах, условиях их применения, составе сооружений.
3. В каких случаях применяют траншейные водосбросы, как определить длину водобойного фронта?
4. Когда устраивают трубчато-ковшовые водосбросы? Расскажите о составе сооружений, расчете входной части.
5. Расскажите об условиях применения шахтных водосбросов, составе сооружений и способе определения радиуса входной воронки.
6. Для чего служат сифонные водосбросы? Их достоинства и недостатки, особенности зарядки.
7. Какие типы водовыпусков Вам известны? Укажите принципиальные особенности их высотного расположения.

Глава 6. ЗАТВОРЫ ГИДРОТЕХНИЧЕСКИХ СООРУЖЕНИЙ

6.1. ПОНЯТИЕ О МЕХАНИЧЕСКОМ ОБОРУДОВАНИИ ГИДРОСООРУЖЕНИЙ

Вместе с другими подвижными конструкциями водопропускных сооружений затворы относятся к категории механического оборудования. Они предназначены для полного или час-

тичного закрытия пролетов с целью регулирования уровней ВБ или расходов, забираемых из него, и представляют собой жесткое или гибкое полотнище, воспринимающее нагрузки от давления воды и передающее их на бетон сооружения.

К механическому оборудованию, кроме затворов, относят сороудерживающие решетки, рыбозаградители, механические устройства для создания заданного поля скоростей в потоке, а также механизмы для очистки заграждений от плавающих тел и уборки мусора. Сюда же входят разного рода подъемно-транспортные механизмы (краны, подъемники) и вспомогательное оборудование (захватные балки, подхваты) для маневрирования затворами и другими устройствами (подъем — опускание, перенос из пролета в пролет и т. д.) и фиксации их в заданном положении. Иногда в категорию механического оборудования включают крановые пути, подкрановые балки, служебные мосты, эстакады и трубопроводы.

6.2. КЛАССИФИКАЦИЯ ЗАТВОРОВ

По положению относительно уровня воды ВБ затворы могут быть *поверхностными* и *глубинными*. В первом случае верх затвора несколько превышает НПУ, во втором — находится ниже него. При заглублении под уровень более 50 м затвор относится к высоконапорным.

По эксплуатационному назначению затворы делят на основные (иногда употребляют термин «рабочие»), аварийные, ремонтные и строительные.

Основные затворы предназначены для постоянной эксплуатации; ими регулируют пропускаемые расходы, сброс льда и плавающих тел.

Аварийные затворы не являются регулирующими, а служат лишь для экстренного закрытия отверстий в связи с аварией основного затвора и должны надежно и быстро опускаться в потоке жидкости.

Ремонтные затворы (заграждения) устраивают в начале водопропускного тракта. Особенность их — установка в спокойной воде, когда отверстие закрыто основным или аварийным затвором, поэтому такие заграждения часто выполняют из составных элементов и монтируют прямо в пролете с использованием малых грузоподъемных средств.

Строительные затворы могут быть нерегулирующими и регулирующими. Первые применяют только для закрытия строительных водоводов после окончания их эксплуатации. Затворы опускают в поток жидкости, поэтому они должны иметь большой вес. В ряде случаев их изготавливают из железобетона. Регулирующие строительные затворы в строительный период

выполняют функции основных и по роду своей работы и конструкции не отличаются от последних.

По конструктивным признакам затворы различают:

по виду движения при маневрировании — на движущие поступательно, вращающиеся, перекатывающиеся и свободно плавающие;

по виду привода — на затворы с ручным, механическим и гидравлическим приводом, а также вододействующие;

по материалу — на затворы стальные, из легких сплавов, деревянные, железобетонные и тканевые;

по виду управления — с ручным и дистанционным управлением и затворы-автоматы.

Затворы с ручным приводом применяют на малых сетевых мелиоративных сооружениях, где подъемные усилия невелики. Наиболее распространен электропривод, когда затвор подни-

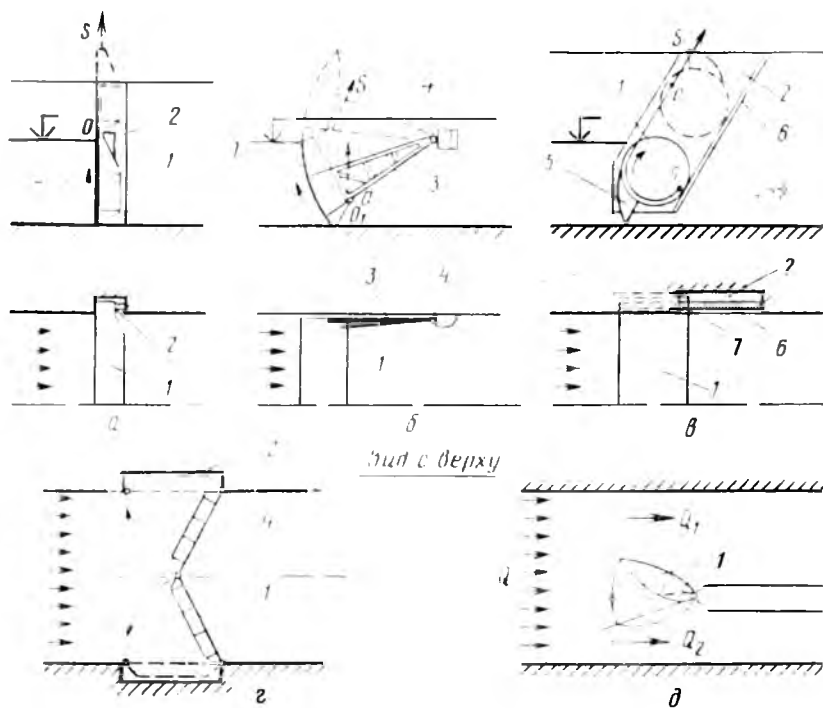


Рис. 6.1. Схемы затворов, передающих нагрузки на быки и устои:

а — плоский; б — сегментный; в — вальцовый; г, д — с вертикальной осью вращения — двусторонние ворота (г) и затвор-вододелитель (д); 1 — корпус затвора; 2 — пазы; 3 — портал; 4 — опорный шарнир; 5 — козырек; 6 — зубчатый рельс; 7 — зубчатый венец на затворе; S — подъемное усилие; O , C — точки закрепления тяги подъемного устройства; Q_1 , Q_2 — расходы воды

мают с помощью лебедок разного вида, приводимых в движение электродвигателем. Такие подъемники имеют и ручной привод, позволяющий при аварийном отключении электричества маневрировать затвором. Гидропривод используют при больших подъемных усилиях. Вододействующие затворы приводятся в движение силой давления воды ВБ, они автономны, не требуют дополнительных подъемных устройств и достаточно просто могут быть автоматизированы. Заметим, что каждый из видов привода, кроме ручного, позволяет использовать затвор в режиме дистанционного и автоматического управления.

Затворы поверхностных (водосливных) отверстий. В дополнение к указанным ранее пунктам классификации, такие затворы, в зависимости от характера передачи давления воды на бетон сооружения, подразделяют на передающие нагрузку: на быки, на порог, на быки и порог. Существует и четвертый вид затворов, которые, воспринимая гидростатическое давление, не передают его на бетон, являясь полностью уравновешенными.

Затворы, передающие давление воды на быки. Схемы таких затворов приведены на рисунке 6.1. Наиболее распространенным является плоский затвор (схема *а*), представляющий собой пространственную конструкцию *1* с плоской напорной гранью, опертую по двум сторонам и передающую нагрузку от воды через опорно-ходовые устройства в пазах *2* на бетон сооружения. Такой затвор движется поступательно, для его перемещения необходимо приложить вертикальное подъемное усилие *S*, большее суммы сил собственного веса и трения в опорах. Опорно-ходовые устройства размещены в пределах нижних двух третей затвора; для того, чтобы они не выходили из паза при подъеме затвора, высота его должна быть не менее $1\frac{1}{3}$ глубин на пороге водослива. Плоские затворы способны перекрывать пролеты до 20...40 м с напорами до 15 м, просты по конструкции и используются во всех эксплуатационных назначениях. Наиболее часто их выполняют стальными, редко — деревянными или железобетонными. Перспективно применение легких нержавеющей сплавов, что сдерживается пока их высокой стоимостью.

Сегментные затворы (схема *б* на рис. 6.1) по частоте применения находятся на втором месте после плоских. Они сложнее по конструкции, так как имеют корпус с криволинейной напорной поверхностью; нагрузка от него передается на бетон через портал *3* («ноги»), которого нет у плоского затвора, и опорный шарнир *4*. Параметры перекрываемых сегментным и плоским затворами пролетов примерно одинаковы. В отличие от плоского, сегментный затвор движется, вращаясь вокруг оси шарниров, и не требует устройства пазов, что позволяет делать быки меньшей толщины; высота быка при закреплении подъ-

емных тяг в нижней части корпуса затвора (точки O ; O_1) может быть минимальной. Однако длина быка в случае сегментного затвора оказывается больше из-за значительных размеров последнего вдоль потока.

Подъемное усилие сегментного затвора меньше, чем плоского, поскольку при цилиндрической форме напорной поверхности силы гидростатического давления почти не создают момента в опорном шарнире, а часть собственного веса затвора через шарнир передается на бетон. Поэтому усилие S может быть даже меньше веса конструкции. Из-за относительной сложности, необходимости значительного пространства для размещения сегментные затворы применяют реже, чем плоские, и преимущественно как рабочие.

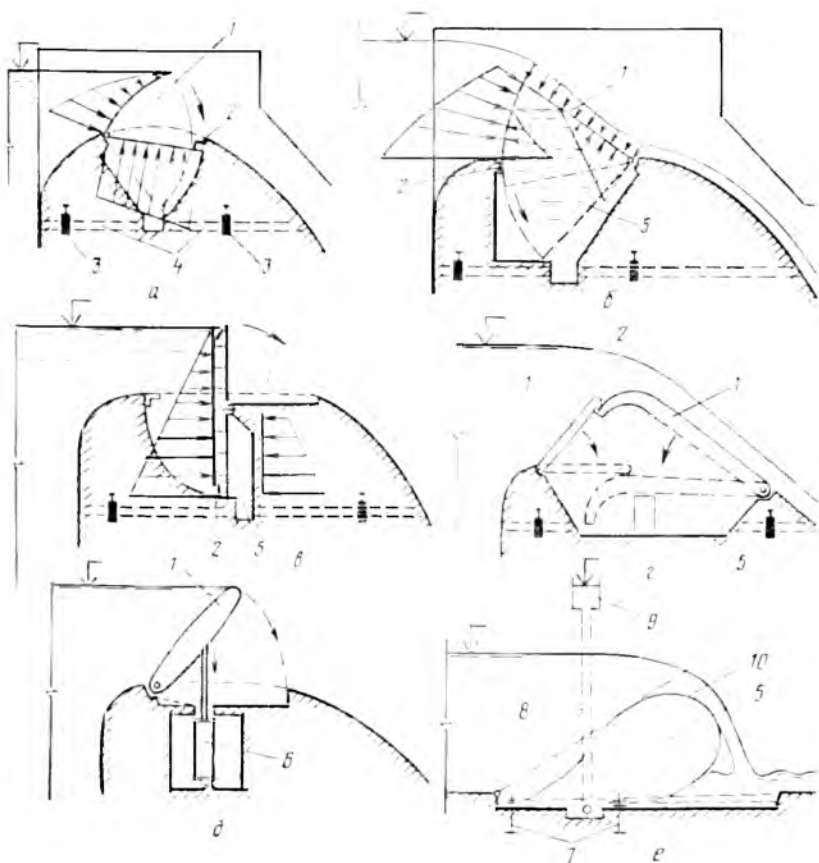
Катковый затвор 1 (схема $в$ на рис. 6.1) представляет собой полый жесткий металлический цилиндр, перекрывающий водосливной пролет и передающий нагрузку от воды через зубчатые рельсы 6 , расположенные в пазах 2 . Большая пространственная жесткость цилиндра позволяет перекрывать пролеты до 45...60 м при напорах до 13 м. Часто цилиндр снабжают козырьком 5 , вместо того чтобы увеличить его диаметр, что несколько снижает высокую стоимость конструкции. Поднимают такой затвор посредством гибкой тяги, закрепленной в точке 0 и охватывающей цилиндрический корпус по окружности. С приложением усилия S цилиндр, перекачиваясь зубчатым венцом 7 по рельсу, выкатывается из воды, чем и обусловлено его название «катковый». Как и для плоского затвора, высота и толщина быка определяются необходимостью устройства пазов, из которых затвор в поднятом положении не должен выходить. Достоинство каткового затвора — малое, меньше его веса, подъемное усилие; при правильно подобранных форме козырька и угле наклона рельсов он может даже автоматически выкатываться из воды. Однако из-за высокой стоимости их применяют редко, и только в качестве рабочих.

На схемах $г$ и $д$ (см. рис. 6.1) приведены затворы с вертикальной осью вращения. Затвор на схеме $г$ представляет собой два жестких полотнища, шарнирно закрепленных по одной стороне к устою или быку. Полотнища имеют длину, большую половины пролета отверстия, поэтому в закрытом состоянии, смыкаясь свободными сторонами, они образуют жесткую трехшарнирную раму, передающую распор на бетон сооружения и способную перекрывать пролеты до 20...25 м при напорах до 15...20 м. Такие затворы называют «двухстворчатые ворота». Они не являются регулирующими и имеют лишь два рабочих положения: открытое, показанное на схеме пунктиром, когда створки убираются в нишу и не создают препятствия на пути движения, и закрытое. Створки из одного положения в другое

перемещаются только в спокойной воде, без перепада на затворе. Двухстворчатые ворота — удобные, хотя и относительно дорогие ремонтные заграждения. Применяют их и как рабочие затворы в головах судоходных шлюзов.

Одностворчатый затвор (схема *д* на рис. 6.1) с вертикальной осью является регулирующим с ограниченным диапазоном регулирования. Обычно его применяют на каналах как затвор-вододелитель, увеличивая площадь входного сечения одного отверстия и уменьшая — другого, подающих воду в разные каналы.

Затворы, передающие давление на порог сооружения. Схемы этих затворов показаны на рисунке 6.2. Наиболее распространенные среди них — **секторные затворы** с верховой (*а*) и



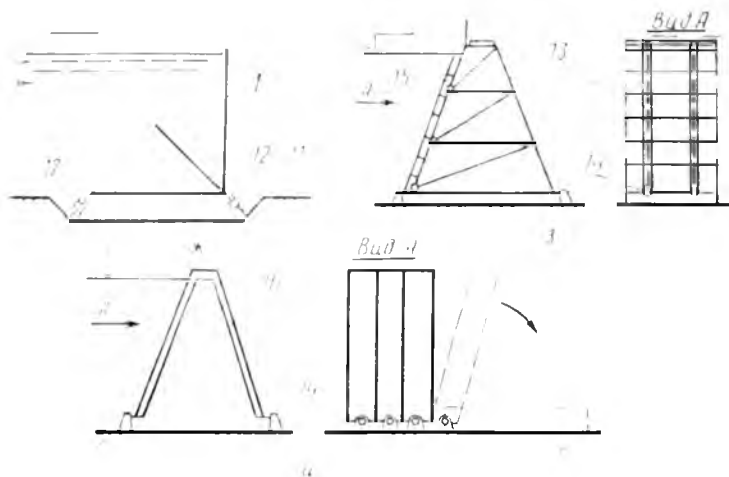


Рис. 6.2. Схема затворов, передающих нагрузки на порог:

a — секторный плавающий с верхней осью вращения; *б* — секторный тонущий с низовой осью; *в* — клапанный вододействующий; *г* — крышевидный; *д* — клапанный с гидropri- водом; *е* — водо-воздухонаполняемый; *ж* — откатной; *з* — с поворотными фермами; *и* — с поворотными рамами; *1* — корпус затвора; *2* — уплотнение; *3* — регулирующие задвижки; *4* — труба для сообщения камеры давления (КД) с ВБ и НБ; *5* — КД; *6* — гидрподъем- ник; *7* — анкерное крепление; *8* — металлический диск; *9* — устройство для поддержания давления в КД; *10* — эластичное полотно; *11* — ходовой рельс; *12* — ходовое колесо; *13* — поворотные фермы; *14* — опорные шарниры; *15* — деревянные шиты; *16* — поворотные рамы

низовой (*б*) осью вращения (см. рис. 6.2). Корпус *1* такого за- твора — жесткая решетчатая пространственная конструкция, шарнирно закрепленная на пороге и для пропуска расхода опускающаяся в специальную нишу. Секторные затворы делят на поплавковые и тонущие. У поплавкового (схема *a* рис. 6.2) обшивка корпуса создает герметичную полость, заполненную воздухом. Между низовой обшивкой и стенкой ниши, называе- мой камерой давления *5*, устроено уплотнение *2*, препятствую- щее утечке воды из нее. Через водоводы *4*, снабженные за- движками *3*, камера давления сообщается с ВБ и НБ. При от- крытии водовода ВБ давление в камере повышается, и момент сил давления на нижнюю поверхность затвора заставляет его поворачиваться, преграждая путь потоку. Закрытие указанно- го водовода и сообщение камеры давления с НБ уменьшают выталкивающую силу, и нагрузка на затвор сверху заставляет его опускаться в нишу. Частично открывая регулирующие за- движки *3*, можно зафиксировать затвор в любом заданном по- ложении. Поднимают и опускают затвор в этом случае силы давления воды, поэтому такие затворы называют вододействи- ющими.

Вододействующим является и секторный затвор с низовой осью вращения, не имеющий обшивки снизу (схема б на рис. 6.2). Манипулируя задвижками водоводов, устанавливают заданный уровень воды в полости, образованной камерой давления и обшивкой, так, чтобы момент сил, действующих на обшивку изнутри, был больше, чем снаружи. (При цилиндрической напорной поверхности силы давления на ее обшивку изнутри и снаружи вращающих моментов не создают, так как их равнодействующая проходит через центр вращения.) В этом случае затвор будет подниматься, закрывая отверстие; снижение уровня воды в полости затвора приведет к его открытию.

Секторные затворы обладают большой пространственной жесткостью и, имея опирание по длине, перекрывают пролеты до 65 м с напорами до 9 м. Несмотря на достоинства (не нужны подъемные механизмы; задвижки водоводов легко могут быть связаны, например, с поплавками, контролирующими уровни воды в бьефах, что позволяет автоматизировать работу сооружения), конструкция такого затвора сложна в изготовлении и дорога, а камера давления может заноситься наносами, и в суровых климатических условиях трудно исключить замерзание воды в водоводах. Поэтому секторные затворы применяют только как рабочие и значительно реже, чем плоские и сегментные. Обычно секторные затворы изготавливают из металла (ранее — из дерева), но, чтобы снизить стоимость, применяют и железобетон. В этом случае затвор делают поплавковым.

Сопоставляя схемы с верховой и низовой осью вращения, можно видеть, что затвор по схеме а более компактен, чем по схеме б, и лучше вписывается в очертания водосливного профиля, не снижая его пропускной способности. При низовой оси более удобно сбрасывать над затвором лед и другие плавающие тела.

Клапанный — другая разновидность вододействующего затвора (схема в, рис. 6.2). Здесь камера давления образована стенкой ниши и металлическим полотнищем затвора, шарнирно закрепленным примерно посередине на пороге водосливного отверстия. В шарнире и на контакте со стенкой ниши, имеющей циркульное очертание, устроены уплотнения, а камера давления сообщается с ВБ и НБ. В зависимости от степени открытия регулирующих задвижек в камере создается давление, меньшее или равное давлению ВБ; при этом затвор будет подниматься или опускаться, меняя пропускаемый расход. По конструкции клапанный затвор проще, чем секторный, но хуже вписывается в водосливной профиль и обладает меньшей жесткостью, что ограничивает размер перекрываемых пролетов (40...45 м) и напор (5...7 м). Область применения клапанных вододействующих затворов та же, что и секторных.

Указанные затворы требуют устройства довольно глубокой ниши, поэтому применение их в плотинах с низким порогом нерационально. В меньшей степени этот недостаток присущ конструкции, показанной на схеме *г* (см. рис. 6.2). Затвор образован двумя шарнирно закрепленными на пороге металлическими полотнищами, одно из которых опирается на другое, образуя подобие двухскатной крыши, из-за чего такие затворы называют *крышевидными*. Герметичные облицовки полотнищ вместе с неглубокой нишей образуют камеру давления. При открытой задвижке водовода ВБ на полотнища снизу действуют силы большие, чем пригрузка сверху от движущегося потока. Они и создают моменты, поднимающие затвор. Регулируя с помощью задвижек давление в камере, маневрируют затворами, которые способны перекрывать пролеты длиной до 50 м с напорами до 5...7 м. Обладая высокой скоростью маневрирования и не требуя устройства глубокой ниши, крышевидные затворы используются в качестве рабочих в плотинах с низким порогом, особенно при быстронаступающих паводках, позволяя легко сбрасывать лед и другие плавающие тела. Ограничивает их применение сложность системы уплотнений 2, особенно в месте подвижной опоры, большая чувствительность к отложению наносов в камере давления и к обмерзанию — недостатки, характерные для всех вододействующих затворов.

Вододействующими являются и *мягкие* затворы (схема *е*, рис. 6.2), представляющие эластичную оболочку 10, обычно из прорезиненной синтетической ткани, закрепленную на пороге. Во внутреннее пространство 5 оболочки подается под давлением вода или воздух. Для перекрытия отверстия давление внутри оболочки должно быть несколько выше давления ВБ, поэтому нужно иметь небольшую подкачивающую установку 9. Мягкие затворы могут закрывать очень большие пролеты при напорах до 6 м и более и позволяют легко менять пропускную способность сооружения, сбрасывать небольшие плавающие тела, мусор. Они не боятся обмерзания, так как даже при малом изменении геометрии сечения корка льда отскакивает от оболочки, однако чувствительны к повреждению при ударах льда, бревен и т. д. Для защиты их возможно устройство щита 8, шарнирно закрепленного на пороге сооружения и опирающегося на оболочку, которая в этом случае выполняет функции подъемного устройства. При отсутствии давления в полости затвора оболочка опускается на порог в положение, показанное пунктиром (см. рис. 6.2, *е*), создавая помехи движению потока лишь в зонах примыкания к быкам или устоям, где возникают тканевые складки. В таком затворе нет трущихся частей, поэтому ему не страшны наносы; важно лишь обеспечить очистку воды, подаваемой в камеру. Наполняемые мягкие

затворы можно использовать в качестве основных регулирующих затворов плотин и подпорных сооружений, ремонтных затворов судоходных шлюзов и др.

Все рассмотренные затворы, передающие нагрузки на порог сооружения, были вододействующими. Рассмотрим схемы с гидравлическим и механическим приводом. Для подъема *клапанных* затворов (рис. 6.2, д) обычно используют гидроподъемники, размещая их в специальных галереях в теле бетонных плотин, что позволяет не устраивать промежуточных быков даже при очень больших пролетах (до 80 м). Напоры на клапанных затворах не превышают 5...6 м, что вызвано относительно малой жесткостью пролетного строения (обычно металлического). Такие затворы устраивают в качестве основных в плотинах, где возможно разместить достаточно большую галерею для гидропривода, не увеличивая объема бетона. Клапан с гидравлическим или механическим приводом позволяет осуществлять тонкую регулировку уровней, сбрасывать лед, шугу и плавающие тела и поэтому его часто используют как дополнительный элемент плоского, сегментного или вальцового затворов.

Затвор, показанный на схеме *ж* (см. рис. 6.2), представляет жесткую пространственную металлическую или деревянную конструкцию *1* с обшивкой по напорной грани, снабженную колесами *12*, катящимися по рельсам *11*, уложенным поперек потока. Обычно такие затворы называют *откатными* и располагают в нише устоя, выкатывая по рельсам в пролет при ремонте сооружения. Они могут перекрывать значительные пролеты, но требуют устройства глубокой ниши и очень чувствительны к завалу рельсового пути наносами.

Затворы с *поворотными фермами* (см. рис. 6.2, з) выполнены в виде системы плоских металлических ферм *13*, ориентированных вдоль потока и закрепляемых на пороге флютбета с помощью опорных шарниров *14* на расстоянии 1...1,5 м друг от друга. В верхней части фермы связаны цепью, конец которой закреплен на одном из устоев так, что при натяжении цепи все фермы принимают вертикальное положение, а при ослаблении — укладываются на порог, вернее, друг на друга, почти не уменьшая площади живого сечения потока. На поясе фермы, обращенном в ВБ, выполнены направляющие, в которые вставляют плоские деревянные щиты *15*, создавая напорный фронт.

В качестве рабочего такие затворы используют при шлюзовании рек, перегораживая водоток и создавая подпор 3...5 м для обеспечения судоходных глубин на вышележащем участке. На зиму затвор разбирают. Монтируют и демонтируют их за

1...2 сут. Часто такие затворы используют как ремонтные на головах судоходных шлюзов.

Близок к описанному по принципу действия затвор с *поворотными рамами* (см. рис. 6.2, *и*). Напорный фронт здесь образуется незамкнутыми треугольными металлическими или деревянными рамами 16 шириной 0,5...1 м, шарнирно закрепленными на пороге. В вертикальном положении рамы достаточно плотно прилегают друг к другу. Для уменьшения утечки через стыки их закрывают брезентом или резиной. При укладке на порог рамы вкладываются одна в другую, практически не выступая за габариты флютбета. Затворы с поворотными рамами способны перекрывать большие пролеты с напором до 6...8 м, и используют их обычно как ремонтные заграждения на судоходных шлюзах и каналах.

Затворы, передающие давление на порог и быки. Наиболее распространенным затвором этого типа является *клапанный*, по конструкции аналогичный приведенному на рисунке 6.2, *д*. Однако в данном случае (рис. 6.3, *а*) подъемное устройство выполнено в виде лебедок 2 (или гидроподъемников), установленных на быках. Такой затвор можно использовать в водо-

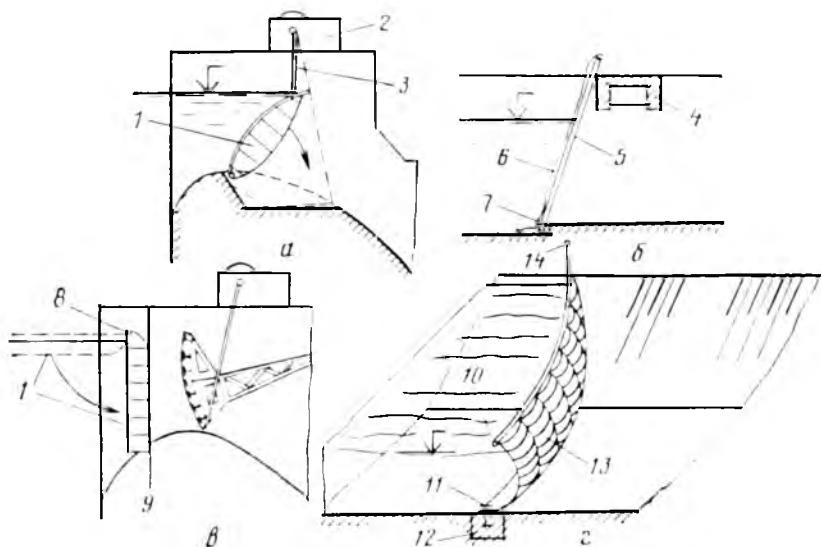


Рис. 6.3. Схемы затворов, передающих нагрузки на порог и быки (устои):

а — клапанный с механическим приводом; *б* — спицевый; *в* — плавающий (батопорт); *г* — мембранный («мембранная плотина»); 1 — корпус затвора; 2 — лебедка; 3 — гибкая тяга; 4 — опорный мост; 5 — металлические трубы («спицы»); 6 — уплотнитель (брезент); 7 — упор; 8 — подвижная ось шарнира; 9 — опорный выступ; 10 — трос; 11 — донное крепление; 12 — анкерный порог; 13 — эластичное полотнище; 14 — береговой анкер

сбросных отверстиях с высоким и низким порогом, как рабочий. Все перечисленные выше достоинства и недостатки клапанов характерны и для него.

Схема *спицевого* затвора приведена на рисунке 6.3, б. Здесь напорный фронт образуют металлические трубы — спицы 5, одним концом опирающиеся на выступ 7 в пороге флутбета, а вторым — на жесткий мост 4, устроенный по быкам. Зазоры между трубами перекрывают брезентом 6, который с моста раскатывают вниз по спицам.

К мостовым относятся и *стоечно-плоские* затворы, где вместо спиц в поток опускают стальные стойки с направляющими для щитов, перекрывающих отверстие. Расстояние между стойками принимают 1,5...2,5 м. Такие затворы способны перекрывать значительные пролеты с напорами 4...6 м. Мостовые затворы чаще всего применяют как ремонтные заграждения, но иногда — и как рабочие в отверстиях плотин с низким порогом. Существенный их недостаток — трудоемкость монтажа и демонтажа.

На рисунке 6.3, в показан плавучий затвор (батопорт) — жесткий металлический корпус-понтон 1, длина которого несколько превышает пролет отверстия, а высота позволяет полностью его перекрыть. Понтон доставляют к отверстию на плаву при закрытом рабочем затворе. В бетоне имеются отверстия, в которые вдвигаются стержни 8, шарнирно связывающие батопорт с быками и фиксирующие его в заданном положении. Открыв клапан, заполняют внутреннюю полость затвора водой, вес его увеличивается, и он опускается, поворачиваясь в шарнире и опираясь на выступы 9 быков и водосливного порога. Такие затворы удобны только при малых колебаниях уровней в ВБ, что существенно ограничивает их применение.

Заканчивая разбор затворов, передающих нагрузку на порог и быки, рассмотрим перспективную конструкцию *мембранной* плотины (рис. 6.3, г), выполняющей одновременно и функции затвора. Это полотнище 13 из синтетической ткани или пленки, одним концом закрепленное на пороге 12 с помощью анкеров данного крепления 11. Верхний конец полотнища связан с тросом 10, натянутым поперек потока; концы его закреплены на берегах, быках или устоях сооружения. Под давлением воды оболочка принимает криволинейную в плане и по высоте форму.

Мембранные плотины монтируют быстро, без применения сложных механизмов, при необходимости их легко опустить на порог, ослабив трос 10, для пропуска плавающих тел или на зиму.

6.3. ЗАТВОРЫ ГЛУБИННЫХ ОТВЕРСТИЙ

Дополнительно к классификации, приведенной ранее, затворы глубинных отверстий подразделяют на конструкции, передающие нагрузки на бетон сооружения, и конструкции, имеющие жесткий «самонесущий» корпус, полностью воспринимающий давление воды, и уравновешенные затворы, не имеющие опор для передачи сил гидростатического давления.

Затворы, передающие нагрузки на бетон сооружения. К ним относятся плоские и сегментные затворы, показанные на рис. 6.4. Плоские затворы работают при напорах до 150... 200 м, выполняя функции как рабочих, так и аварийных и ремонтных. Они перекрывают отверстия при максимальных напорах площадью, соответственно до 25... 40 м². Выполняют их стальными или из легких сплавов.

При обтекании затвора потоком возникают значительные гидродинамические нагрузки, препятствующие его опусканию на порог. Поэтому высоконапорные затворы имеют гидравлический привод либо механический с жесткими тягами, позволяющий обеспечить принудительную «посадку». При небольших напорах, а также для маневрирования ремонтными затво-

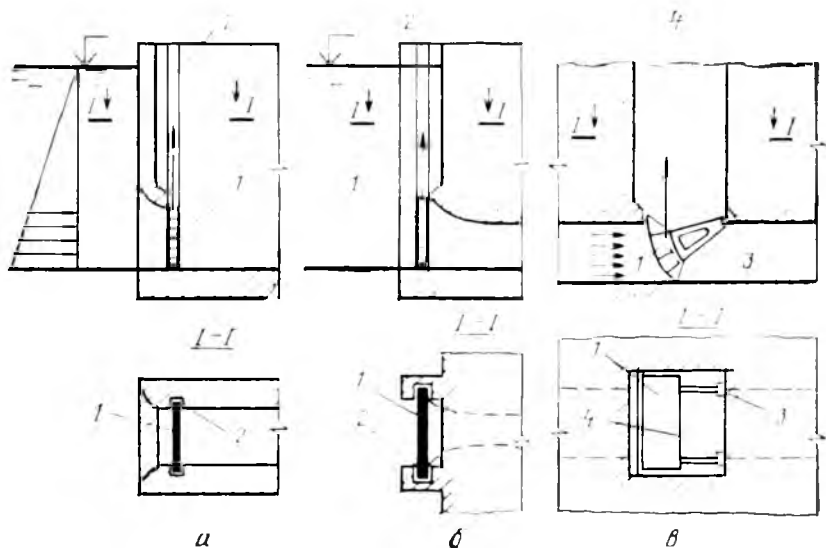


Рис. 6.4. Схемы глубинных затворов, передающих нагрузку на бетон сооружения:

а, б — плоский; в — сегментный; 1 — пролетное строение затвора; 2 — пазы; 3 — опорный шарнир; 4 — шахта управления затвором

рами применяют механический привод с гибкими тягами, иногда — с дополнительной пригрузкой затвора. Если необходимо создать большие усилия для «дожима», то затвор размещают так, как показано на рисунке 6.4, б. В этом случае на его верхний торец давит вышележащий столб жидкости, облегчая «посадку», однако это увеличивает и подъемное усилие.

Сегментные затворы (см. рис. 6.4, в) применяют при тех же напорах, что и плоские, и только в качестве рабочих. Площадь перекрываемых отверстий до 40...45 м². Здесь также существует проблема «посадки» на порог, которую решают, используя подъемники с жесткими тягами.

Затворы с самонесущим корпусом. Применяют их на металлических и других напорных трубопроводах и устанавливают либо в разрыве труб (рис. 6.5, а, б, в), либо в конце трубопровода (рис. 6.5, г).

Цилиндрический затвор, представляющий собой цилиндр 2 с горизонтальной осью 3, в котором выполнено отверстие диаметром, равным внутреннему диаметру трубы, приведен на рисунке 6.5, а. Затвор является регулирующим, однако наиболее часто цилиндрические затворы используют как аварийно-ремонтные при средних напорах и диаметрах трубопровода 2...4 м.

Часто в трубопроводах применяют *плоские* задвижки (см. рис. 6.5, б), представляющие собой запорный диск 4, перемещающийся в пазах стального или чугунного корпуса 1 при помощи винтового, обычно электрифицированного, подъемника 5, 6, или гидропровода. При напорах до 25...30 м задвижки используют для регулирования расходов, при больших (до 250 м) — только как ремонтные затворы. Серийно выпускаемые в СССР задвижки рассчитаны на диаметр трубопровода до 1,5 м, но бывают конструкции, перекрывающие отверстия с площадью сечения до 5...6 м² при напоре 100 м.

Дисковый дроссельный затвор (см. рис. 6.5, в) представляет собой диск 7 чечевицеобразной формы, поворачивающийся на горизонтальной или вертикальной оси 3 в корпусе 1. В открытом положении диск хорошо обтекается потоком, создавая небольшое гидравлическое сопротивление, а в закрытом (пунктир на рис. 6.5, в) он смыкается с уплотняющим устройством внутри корпуса. При частичном открытии из-за неравномерного обтекания с одной стороны диска происходит отрыв потока и образование вакуума, а с другой — повышение давления, и, как следствие, резко возрастают усилия на оси. Поэтому при средних и больших напорах (30...250 м и даже до 800 м) такие затворы применяют как аварийно-ремонтные и лишь при напорах 20...30 м — как регулирующие, с диаметром диска до 5...8 м.

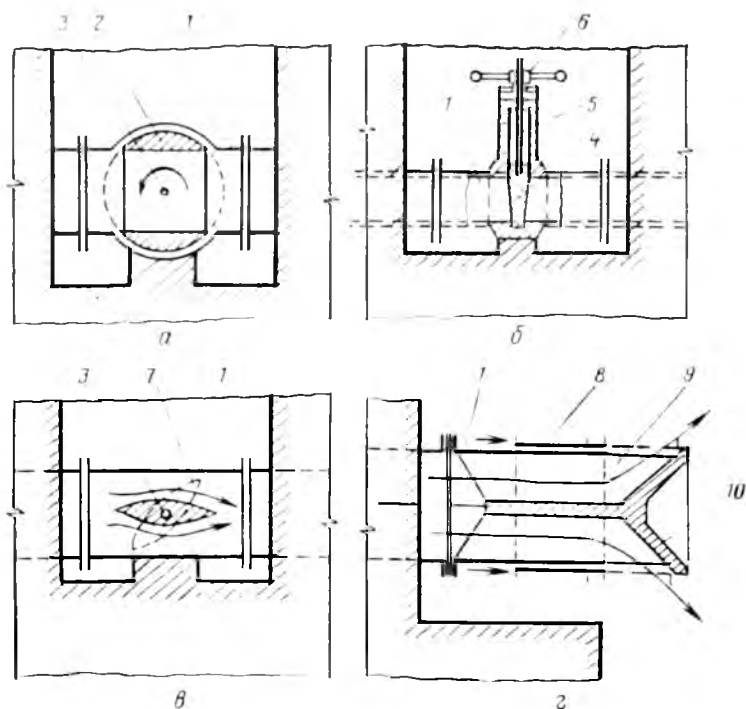


Рис. 6.5. Схемы затворов трубопроводов с самонесущим корпусом:

а — цилиндрический; *б* — задвижка; *в* — дисковый; *г* — конусный; 1 — корпус затвора; 2 — цилиндр с отверстием; 3 — ось вращения; 4 — запорный диск; 5 — винт; 6 — гайка; 7 — диск-дрессель; 8 — подвижный патрубок; 9 — продольное ребро; 10 — конус

Регулирующим является *конусный* затвор (см. рис. 6.5, *г*). Внутри стального корпуса 1 с помощью ребер 9 укреплен конус 10. Поток, обтекая с большой скоростью конус, вылетает в виде конической струи, захватывая воздух и превращаясь в шлейф брызг и водяной пыли. Это способствует уменьшению размывов в НБ, но приводит к намоканию конструкций, а в суровых климатических условиях — к их обмерзанию. Для уменьшения разбрызгивания за конусными затворами устраивают камеры гашения цилиндрической или более сложной формы, концентрирующие поток. Закрывают затвор перемещением подвижного патрубка 8, перекрывающего кольцевой зазор между корпусом затвора и конусом (пунктир на рис. 6.5, *г*). Затвор полностью уравновешен и хорошо работает на всех режимах, регулируя расходы в трубопроводах диаметром до 2,5 м (иногда до 6 м) при напорах до 250 м.

6.4. ПЛОСКИЕ ЗАТВОРЫ ГИДРОСООРУЖЕНИЙ

Основное их достоинство — простота конструкции и малая толщина затвора, что делает сооружение компактным.

Основные элементы плоского поверхностного затвора показаны на рисунке 6.6. Из этих же элементов состоят и глубинные затворы, но имеют конструктивные особенности. Давление воды воспринимается плоским пролетным строением 3 и передается на жесткие вертикальные элементы 2 — опорно-концевые стойки, на которых размещены опорно-ходовые части 4. Через них нагрузка передается на опорный элемент — рельс 1 в пазу быка или устоя. Для предотвращения бокового смещения затвора служат боковые опорные устройства 5, а плотную посадку в паз обеспечивают обратные направляющие устройства 6. Важным элементом являются уплотнения 7, предотвраща-

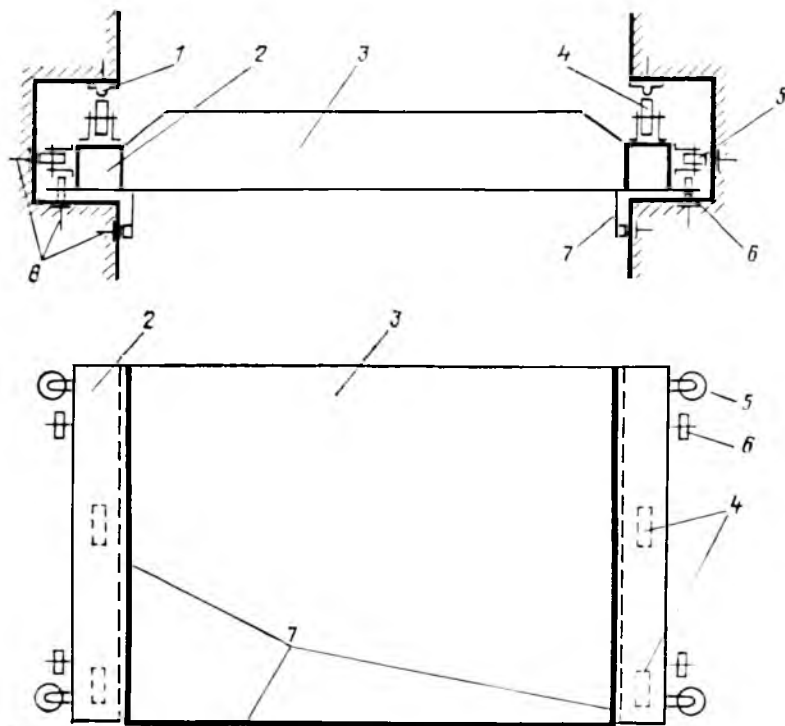


Рис. 6.6. Основные элементы плоского затвора:

1 — опорный рельс; 2 — опорно-концевые стойки; 3 — пролетное строение; 4 — опорно-ходовые части (колеса); 5 — боковые опорные устройства (колеса); 6 — обратные направляющие устройства (колеса); 7 — уплотнения; 8 — закладные детали

щающие утечку воды в обход затвора по контуру водопропускного отверстия. Относятся к затвору и элементы, заделанные в бетон (закладные детали 8), являющиеся путями боковых опорных и обратных направляющих устройств и контактными поверхностями уплотнений.

6.4.1. ПРОЛЕТНОЕ СТРОЕНИЕ И СХЕМЫ УСТРОЙСТВА БАЛОЧНОЙ КЛЕТКИ

Пролетное строение плоских затворов, поверхностных и глубинных, при малых размерах перекрываемых отверстий (пролет до 1,5 м, высота до 0,8 м) и напорах до 2...3 м можно выполнять из шпунтованных досок 1 или брусьев, соединенных деревянными шпонками и металлическими полосами 2 с подъемными крюками (рис. 6.7, а). Такие затворы используют на сетевых сооружениях мелиоративных систем и в качестве съемных щитов затворов с поворотными фермами и мостовых. Они не имеют опорно-ходовых устройств и специальных уплотнений. Относительная герметичность обеспечивается деформацией древесины, прижимаемой к стенкам паза или направляющим силами гидростатического давления.

Простейший стальной затвор, применяемый в тех же условиях (рис. 6.7, б), представляет собой стальную обшивку 5 толщиной 4...6 мм, подкрепленную по контуру рамкой 4 из уголков. Он, как и деревянный, не имеет специальных опорно-ходовых устройств и опирается выступами обшивки на металлические детали паза. Поднимают затвор за проушину 3, приваренную к обшивке, обычно с помощью винтового ручного подъемника. Иногда такие затворы снабжают простейшими уплотнениями 6 в виде брезентовой или резиновой полосы, закрепленной к уголкам 4 и обшивке на напорной поверхности.

При больших размерах отверстий, примерно до 2,5 м, применяют стальные ригельные затворы (рис. 6.7, в), пролетное строение которых образовано ригелями 9 из прокатных профилей с приваренной обшивкой 5 толщиной 6...8 мм. В поверхностных затворах обычно устраивают два ригеля, в глубинных — три-четыре так, чтобы нагрузка на все была одинаковой. Через ригели усилия передаются опорно-концевым стойкам 7 коробчатого сечения, опирающимся на закладные детали паза и создающим вместе с ригелями жесткий каркас затвора. Обшивку в пролете подкрепляют жестким ребром — диафрагмой 8, а в нижней части — ребрами 10. Поднимают затвор за проушину в диафрагме либо за опорные стойки, если высота его меньше его пролета.

При значительных пролетах и напорах для увеличения жест-

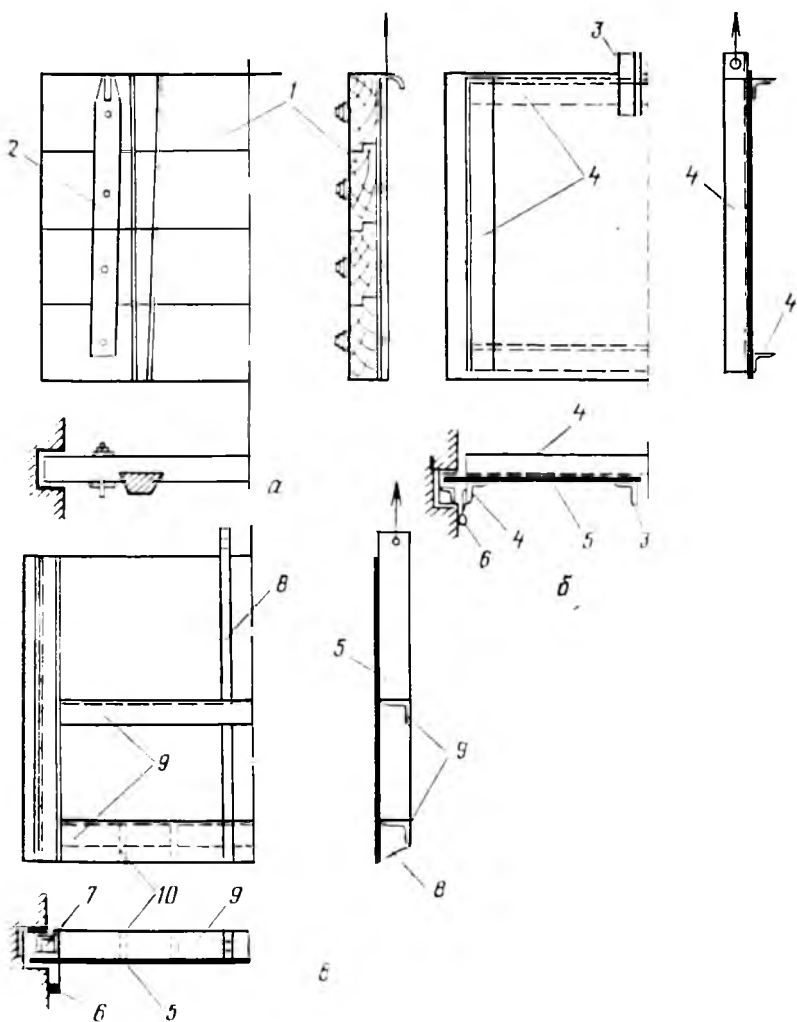


Рис. 6.7. Схемы простейших плоских затворов:

a — деревянный щит; *б* — металлический щит, подкрепленный по контуру; *в* — металлический двухригельный щит; *1* — шпунтованные доски; *2* — металлическая полоса с крюком; *3* — проушина для подъема затвора; *4* — подкрепляющая рамка из уголков; *5* — стальная обшивка; *6* — уплотнения; *7* — опорно-концевая стойка из прокатных профилей; *8* — диафрагма с проушиной для подъема затвора; *9* — ригели; *10* — ребра жесткости

кости пролетного строения устраивают балочную клетку в виде продольных (параллельных главным ригелям) и поперечных балок, соединяя с ней обшивку.

6.4.2. ОПОРНО-ХОДОВЫЕ ЧАСТИ ЗАТВОРОВ

Их наиболее часто делают двух видов: опоры скольжения и колесные. Простейшая схема опор скольжения — когда деревянный или металлический щит скользит вдоль паза или направляющих из металла (см. рис. 6.7). При относительно больших нагрузках в пазу устраивают рельс, а на щите закрепляют гладко обработанные стальные или бронзовые опоры. Недостаток таких опорно-ходовых частей: высокий коэффициент трения на контакте и соответственно значительное усилие, необходимое для маневрирования затвором.

При больших нагрузках на затвор применяют опоры с вкладышами из древесно-слоистого пластика ДСП и маслянита — специальной пластмассы с добавлением графита (рис. 6.8, а). На 1 см длины опоры допускается нагрузка 1...5 т.

Важным свойством ДСП и маслянита является их низкий коэффициент трения по стали: при движении — 0,04...0,07, в состоянии покоя — 0,1...0,2. Заметим, что соответствующие коэффициенты для пар «сталь по стали» и «дерево по стали» составляют около 0,15...0,2 и 0,5, то есть примерно в 3 раза выше.

Достоинство опор скольжения — их высокая надежность, низкая стоимость, малые габариты, позволяющие сделать паз минимальных размеров, простота ремонта и замены при относительно небольших силах сопротивления движению, а недостаток — быстрый износ при частой эксплуатации и существенная разница коэффициентов трения покоя и движения, что приводит к необходимости иметь большой запас грузоподъемности для трогания затвора с места. Указанных недостатков

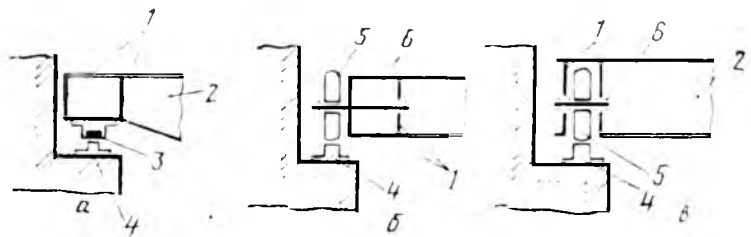


Рис. 6.8. Схемы устройства опорно-ходовых частей плоского затвора: а — опора скольжения; б — колесо на консоли; в — между стенками опорно-концевой стойки; 1 — стенка опорно-концевой стойки; 2 — ригель; 3 — скользящая опора; 4 — рельс; 5 — колесо; 6 — ось

лишены колесные опорно-ходовые части. Колесные опоры выполняют в виде отдельных колес на осях, жестко закрепленных в опорно-концевых стойках консольно (см. рис. 6.8, *а*) или между их стенками (рис. 6.8, *б*), либо так, как показано на рисунке 6.6. В колесных опорах нагрузка на одно колесо может достигать 300...350 т при его диаметре до 1...1,2 м.

При меньшем, по сравнению со скользящими, сопротивлении движению, отсутствии рывка при трогании с места, а также значительно меньшем износе колесные опоры, однако, значительно сложнее и дороже в изготовлении и монтаже, требуют больших размеров пазов и поэтому применяют их реже, чем опоры скольжения.

6.4.3. УСТРОЙСТВО УПЛОТНЕНИЙ

Главное требование, предъявляемое к уплотнениям,— водонепроницаемость, высокая износостойкость, простота ремонта и замены, а также малое сопротивление движению затвора.

По принципу действия уплотнения подразделяют на гидравлические, механические и управляемые. В поверхностных затворах обычно применяют первые два типа. Принцип действия гидравлического уплотнения ясен из рисунка 6.9, *а*. Уплотне-

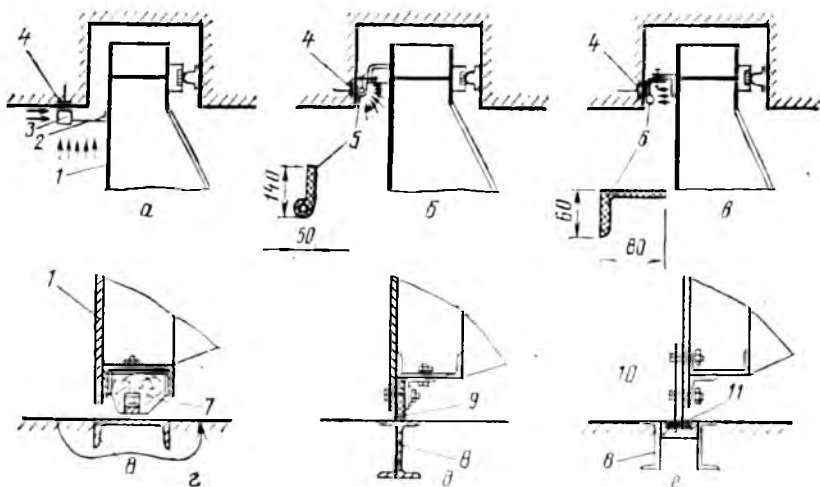


Рис. 6.9. Схемы боковых и горизонтальных уплотнений гидравлического действия (*а, б, в*) и донных механических (*г, д, е*):

1 — обшивка затвора; 2 — упругая стальная полоса; 3 — деревянный брус; 4 — шлифованная пластина из нержавеющей стали; 5, 6 — профилированные уплотняющие элементы (резина, полиэтилен); 7 — донный брус; 8 — закладные детали в пороге; 9 — резиновая полоса; 10 — стальной «пояс»; 11 — заливка мягким сплавом (баббит)

ние — упругая полоса 2 из нержавеющей стали, закрепленная на обшивке затвора 1 и снабженная деревянным брусом — уплотняющим элементом 3. Давление воды на упругую полосу прижимает уплотняющий элемент к шлифованной металлической пластине 4, заложенной в бетоне быка или устоя. Обеспечивая хорошую герметичность, эта схема создает значительное сопротивление движению затвора из-за излишне большого вылета упругой полосы, перекрывающей пространство между обшивкой и границей паза.

Меньшее сопротивление движению при высокой герметичности имеет уплотнения из профильной армированной резины или полиэтилена высокого давления (рис. 6.9, б, в, поз. 5, 6), размещающиеся непосредственно в пазу затвора. Такие уплотнения применяют как боковые в поверхностных и глубинных затворах малых и средних напоров; в последних их используют и как верхние горизонтальные уплотнения.

Уплотнения механического действия чаще всего применяют в качестве донных (рис. 6.9, г...е). Плотность закрытия обеспечивается механическим прижатием (силами веса затвора или дополнительных усилий) деформируемого деревянного донного бруса 7 или резиновой полосы 9 к порогу отверстия. В глубинных затворах применяют ножевое уплотнение (см. рис. 6.9, е), где стальной нож 10 затвора вдавливается в полосу из мягкого сплава 11, устроенную вдоль порога отверстия.

6.4.4. ОСОБЫЕ КОНСТРУКЦИИ ПЛОСКИХ ЗАТВОРОВ

Большим достоинством плоских затворов является возможность перестановки их из пролета в пролет, позволяющая иметь, например, на все многопролетное сооружение один-два ремонтных затвора.

Наиболее удобны в этом отношении плоские секционные затворы (рис. 6.10, а). Они могут быть поверхностными и глубинными и состоят из нескольких двух-трехригельных секций, снабженных сцепными устройствами 3 и межсекционными уплотнениями 1. Транспортируют затворы из пролета в пролет секциями, соединяя их по мере установки в паз. Разновидность многосекционных затворов — ремонтные шандорные заграждения, у которых секции выполнены одноригельными в виде металлической, деревянной или железобетонной балки — шандора, снабженной простейшими уплотнениями, без специальных опорно-ходовых устройств. Их опускают и поднимают по одному и, как правило, в стоячей воде.

Известную трудность для плоских затворов представляет пропуск льда и плавающих тел, так как поднырывающие под частично открытый затвор льдины могут его повредить, а сброс

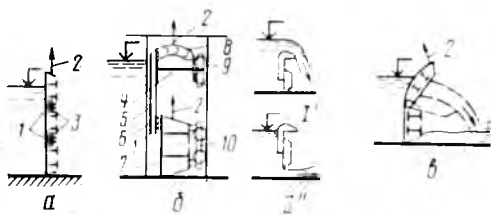


Рис. 6.10. Особые виды плоских поверхностных затворов:

а — многосекционный; *б* — двойной; *в*, *г*, *д*, *е* — пропуск воды над и под затвором; *ж* — с опускаемым клапаном; *1* — межсекционное уплотнение; *2* — направление тяги привода; *3* — межсекционная сцепка; *4* — ригель верхней секции; *5* — стойки верхней секции; *6* — межсекционное колесо; *7* — нижняя секция; *8* — обтекаемая обшивка верхней секции; *9*, *10* — колесные тележки

де. Воду можно пропускать и из-под затвора (схема *II*, рис. 6.10), а также сверху и снизу. Из-за высокой стоимости такие затворы устанавливают в ограниченное число водосливных пролетов, обеспечивающих сброс плавающих тел и льда.

Клапан затвора по схеме *в* (рис. 6.10) вращается на оси в верхней части пролетного строения; им управляют либо с помощью подъемника, установленного на быках, либо гидроприводом, смонтированным непосредственно на затворе.

6.5. СЕГМЕНТНЫЕ ЗАТВОРЫ

Основными частями затвора (рис. 6.11) являются пролетное строение *2*, ноги *3*, передающие давление воды на быки через опорные шарниры *4*, и уплотнения *6*. Обшивку поверхностного затвора выполняют с радиусом $(1,5 \dots 2,5) H$, глубинного — $(1 \dots 1,5) H$, где H — напор на затвор. Пролетное строение устроено так же, как у плоского, лишь обшивка и стойки имеют криволинейное очертание. Поверхностные затворы, как правило, двухригельные; глубинные имеют обычно два-три равнонагруженных ригеля, образуемых вместе с опорными ногами портал затвора.

Простейшая схема опорного шарнира *4*, который может иметь в подвижной части одну и в неподвижной две проушины или наоборот, показана на рисунке 6.11. Нагрузки на шарниры могут быть значительными (до 2500 т), поэтому ось шарнира достигает 100 см в диаметре. Бетон в зоне их установки армируют, а шарнир крепят к мощной закладной детали *7*.

Уплотнения сегментных затворов по конструкции аналогич-

льда при полностью открытом отверстии приводит к большим потерям воды и сложному режиму сопряжения с НБ. Устранить этот недостаток позволяют сдвоенные затворы (рис. 6.10, *б*). При необходимости пропуска льда или других плавающих тел верхнюю секцию опускают (схема *I*, рис. 6.10) так, чтобы толщина переливающегося слоя позволила им пройти в НБ при минимальном расхо-

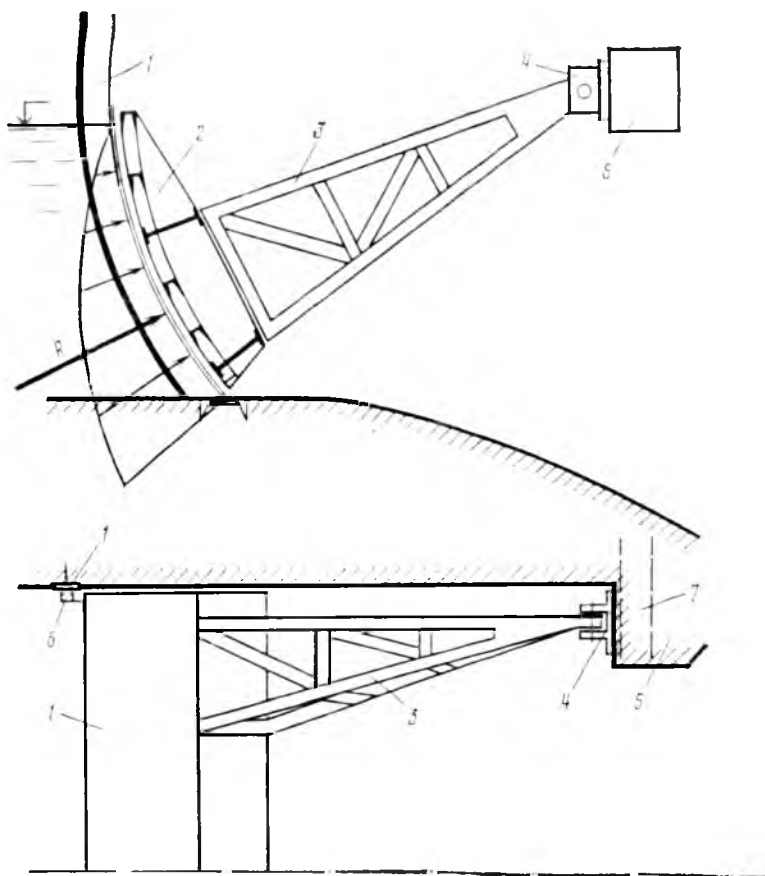


Рис. 6.11. Схема сегментного поверхностного затвора:

1 — шлифованная стальная пластина; 2 — пролетное строение; 3 — ноги; 4 — опорный шарнир; 5 — железобетонная консоль; 6 — уплотнение; 7 — закладная деталь

ны уплотнениям затворов плоских (см. рис. 6.9); разница лишь в том, что вертикальное уплотнение криволинейное и повторяет очертания обшивки.

6.6. НАГРУЗКИ И ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ЗАТВОРЫ

Главными являются гидравлические нагрузки (гидростатические при закрытом и гидродинамические — при частично открытом затворе) и вес затвора; для поверхностных учитывают также нагрузки волновые, снеговые и ветровые, возникающие при ударах льдин и монтаже затвора.

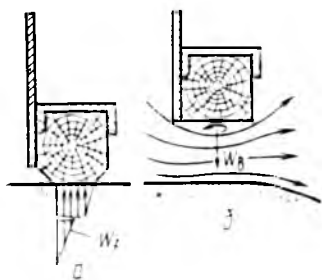


Рис. 6.12. Воздействие потока на нижнюю кромку затвора:

$W_г$ — гидродинамическая сила подсоса; W_f — сила фильтрационного давления

Примерзание ледового поля к обшивке не допускается, поскольку это существенно увеличило бы вес и стоимость конструкции.

Помимо указанных, на затвор действует сила тяги механизма, необходимая для подъема и посадки затвора на порог сооружения, а также силы трения в опорно-ходовых частях и уплотнениях.

Гидравлические нагрузки. На затвор в закрытом положении действуют нагрузки, определяемые по правилам гидростатики. По мере его подъема часть потенциальной энергии воды превращается в энергию движения, что уменьшает силу горизонтального давления на затвор, особенно со стороны ВБ.

В глубинных водоводах с напорным движением потока за частично открытым затвором возможно образование зоны вакуума и развитие кавитационных явлений даже при относительно малых (15...20 м) напорах на сооружении.

Если затвор снабжен широким деревянным уплотнением и находится в закрытом положении (рис. 6.12, а), на него снизу действует сила фильтрационного давления W_f . При подъеме (см. рис. 6.11, б) в щели под уплотнением образуется вакуум, вызывающий силу «подсоса» $W_в$.

Силу веса затвора определяют по чертежам, а на предварительной стадии проектирования — по различным эмпирическим зависимостям.

Силы трения в опорах скольжения и уплотнениях находят по зависимости

$$T = fN,$$

где N — нормальное усилие на контакте; f — коэффициент трения для пары контактирующих материалов.

Определяя эти силы, нужно помнить, что коэффициент трения покоя больше, чем в движении. Более сложный вид имеет выражение для вычисления трения в колесных опорах.

6.7. ОПРЕДЕЛЕНИЕ УСИЛИЙ ДЛЯ МАНЕВРИРОВАНИЯ ПЛОСКИМ И СЕГМЕНТНЫМ ЗАТВОРАМИ

При расчете этих усилий рассматривают следующие случаи: подъем затвора, когда силы собственного веса G , пригрузки водой или балластом G_0 , трения в опорах T_0 и уплотнениях T_y

совпадают по направлению, а гидродинамическая сила W_b на нижней кромке направлена вверх или вниз; опускание (посадка) затвора, в этом случае силы трения и фильтрационная W_f , возникающая в момент посадки на порог, направлены вверх и препятствуют опусканию затвора, а гидродинамическая W_b может иметь то или другое направление.

Усилие S_1 , необходимое для подъема плоского затвора, определяют по выражению

$$S_1 = K_1 (G + G_6) + K_2 (T_0 + T_y) \pm W_b,$$

где K_1 — коэффициент перегрузки, учитывающий возможное отклонение фактического веса затвора и пригрузки от расчетного; K_2 — коэффициент, учитывающий возможную неточность в вычислении сил трения.

При опускании затвора возможны два случая: когда силы трения в опорах и уплотнениях невелики и затвор садится под собственным весом (обычно при колесных опорах) и когда силы трения больше сил веса затвора. В первом необходимо удерживать затвор от падения, прикладывая силу S_2 , направленную вверх и равную

$$S_2 = K_1 (G + G_6) - K_2 (T_0 + T_y) \pm W_b,$$

а во втором — дожимать его вертикальным усилием, определяемым по этой же формуле. Принимают $K_1 = 0,9$; $K_2 = 1,2$. В момент посадки на порог необходимо преодолеть не только силы трения, но и фильтрационную силу W_f , приложив усилие:

$$S_{\pi} = K_1 (G + G_6) - K_2 (T_0 + T_y) - W_f.$$

Условия маневрирования сегментным затвором близки к описанным выше, с той лишь разницей, что в расчет вводят не величины сил, а их моменты относительно оси вращения — точки 0 на рисунке 6.13. Так, для подъема затвора к нему нужно приложить момент, позволяющий преодолеть моменты от веса затвора и сил трения в шарнире и уплотнениях (см. рис. 6.13, а). Затвор будет в равновесии, если

$$Sh_s - Gh_g - T_y R_y - Qf_0 r_{\text{ш}} = 0;$$

значит, усилие S , необходимое для его подъема, вычисляют по выражению

$$S > G (h_g/h_s) + T_y (R_y/h_s) + Qf_0 (r_{\text{ш}}/h_s),$$

где h_s , h_g и R_y — плечи, соответственно, сил подъемной, собственного веса и трения в уплотнениях; Q — нормальная сила в шарнире; f_0 — соответствующий коэффициент трения; $r_{\text{ш}}$ — радиус шарнира, составляющий плечо силы трения, равной Qf_0 .

Расчетное значение подъемного усилия находят по формуле

$$S = K_1 Gh_g/h_s + K_2 T_y R_y/h_s + Qf_0 r_{\text{ш}}/h_s,$$

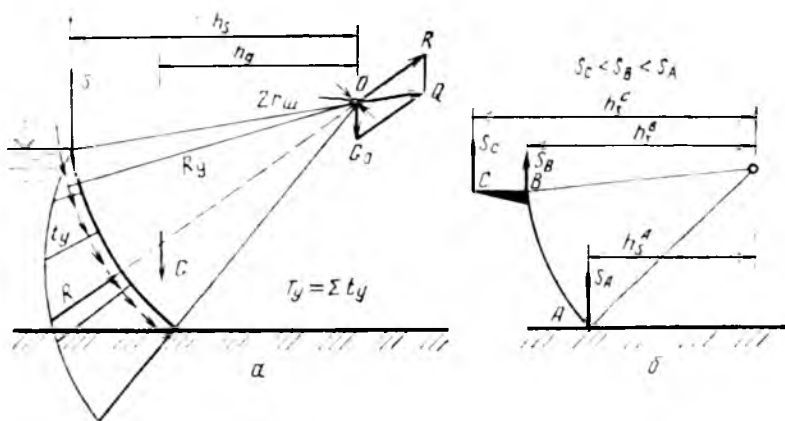


Рис. 6.13. Схема для определения подъемного усилия сегментного затвора:

G_0 — часть собственного веса затвора, передаваемая на шарнир; t_y — трение в уплотнениях, приходящееся на единицу длины

где значения K_1 и K_2 те же, что и для плоского затвора.

При расчете посадки на порог учитывают момент от силы фильтрационного давления в донном брусчатом уплотнении.

Анализируя выражение для подъемного усилия, можно видеть, что влияние трения в шарнире весьма мало, так как $h_s \gg r_{ш}$, а поскольку $h_s > h_g$, то величина S , в отличие от случая плоского затвора, может быть даже меньше собственного веса конструкции.

Усилие, необходимое для подъема сегментного затвора, зависит от точки его приложения: оно больше при закреплении тяги подъемника в точке A , чем в точке B , и при необходимости может быть снижено путем устройства жесткой консоли BC со стороны обшивки (см. рис. 6.13, б).

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Каково назначение затворов гидротехнических сооружений?
2. Какие из известных Вам типов затворов поверхностных отверстий применяют в качестве ремонтных и почему?
3. Какими затворами чаще всего снабжаются строительные водосбросы?
4. В чем состоит идея «вододействующих» затворов?
5. Какие из известных Вам регулирующих затворов глубинных отверстий способны работать при особо высоких напорах? Почему?
6. Перечислите основные элементы плоского затвора. Каковы их функции?
7. В чем достоинства и недостатки скользящих опор плоских затворов в сравнении с колесными?
8. Каковы особенности уплотнений сегментных затворов по сравнению с затворами плоскими?
9. Какой из затворов — плоский или сегментный при одинаковых размерах перекрываемых отверстий требует большего подъемного усилия и почему?

Глава 7. РЕГУЛИРОВАНИЕ РУСЛ РЕК И РЕГУЛИРУЮЩИЕ СООРУЖЕНИЯ

7.1. РУСЛОВЫЙ ПРОЦЕСС

7.1.1. РУСЛОВЫЙ ПРОЦЕСС — ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ НАНОСОНЕСУЩЕГО ПОТОКА С РУСЛОМ

Под русловым процессом принято понимать обширный круг явлений, включающих создание и последующее переформирование естественных русл и пойм рек под действием текущего нанососодержащего потока. Недоучет или неполный учет различных проявлений руслового процесса приводит к нежелательным явлениям:

смыву дождевыми и тальми водами поверхностного слоя грунта с водосборных площадей (водная эрозия) и выносу продуктов размыва в речные долины;

размыву берегов рек, сопровождаемому разрушением дорог, построек и культурных земель, размыву берегов водохранилищ; обмелению речных русл, приводящему к ухудшению судоходства, а также работы водозаборных сооружений;

разделению рек на рукава и протоки; наводнению, приводящему к затоплению огромных площадей, разрушениям построек, и другим бедствиям;

заиленнию ВБ плотинных гидроузлов и водохранилищ и размыву русла НБ, сопровождающемуся понижением уровней воды;

подмыву мостовых опор и других сооружений и т. д.

Основоположники теории руслового процесса (конец XIX в. — начало XX в.) В. М. Лохтин, Н. С. Лелявский, Л. Фарг и др. рассматривали его с *морфологической* точки зрения, то есть обращали внимание на его внешнюю сторону и для количественной оценки предлагали некоторые эмпирические зависимости. *Гидродинамическое направление* в оценке руслового процесса (М. А. Великанов) позднее стало господствующим, его сторонники признавали взаимодействие потока и русла, определенное внимание уделяли гидродинамике наносонесущего потока при наличии размываемого дна; появилась речная гидравлика. В последние десятилетия получило развитие *гидролого-морфологическое* направление теории руслового процесса, согласно которому эрозионные и аккумулятивные процессы как основной фактор руслового процесса относятся лишь к самым крайним, то есть периферийным и низовым звеньям речной сети. Главная работа потока на всем его протяжении сводится к

транспорту наносов, а все русловые и пойменные переформирования являются его внешним проявлением.

Местные размыв и отложения оцениваются как единый обратимый процесс развития целого морфологического образования. Задача теории руслового процесса авторами этого направления трактуется как изучение динамики русловых форм. Расход донных наносов, кинематическая структура потока и его макротурбулентность определяют развитие малых и средних русловых форм — песчаных гряд. Макроформы (система рукавов или протоков, речная излучина), определяющие тип всего руслового процесса, зависят от всего комплекса характеристик режима жидкого и твердого стока. Ведущая роль в формировании собственно русла отводится донным наносам, а взвешенным — формирование пойменных отложений с обратным поступлением продуктов размыва в поток при деформациях русла и поймы.

7.1.2. УСТОЙЧИВОСТЬ РУСЛ РЕК. КЛАССИФИКАЦИЯ

Русло принято считать устойчивым, если его поперечные размеры и положение в плане не претерпевают существенных изменений за обозримый промежуток времени. Другая формулировка устойчивости русла — способность его сопротивляться деформациям при изменении режима потока. Степень неустойчивости русла определяется скоростью деформации его элементов. При длительном взаимодействии потока и русла может создаваться форма русла, устойчивая в той или иной степени.

М. А. Великанов, С. Т. Алтунин, И. А. Кузьмин и другие предложили классифицировать реки по степени устойчивости русла и характеру развития руслового процесса. В. М. Лохтин предложил оценивать устойчивость рек по соотношению двух факторов d/i , где d — диаметр частиц, слагающих русло, мм; i — падение реки на 1 км длины, м. По этому критерию он оценил все крупные реки Европы (Неман, Западная Двина, Припять, Ока, Волга, Западный Буг, Висла, Гаронна и др.). Коэффициент В. М. Лохтина был распространен на реки Сибири, Средней Азии и Дальнего Востока (пределы его колебаний от 10 до 1).

М. А. Великанов предложил усовершенствовать критерий устойчивости В. М. Лохтина и представил его в виде безразмерной величины

$$\eta = D/Hi = gD/gHi = agD/v_*^2 = W^2/v_*^2, \quad (7.1)$$

где D — диаметр наносов, м; H — глубина потока, м; i — гидравлический уклон; g — ускорение свободного падения, м/с²; a — коэффициент поправки

Архимеда, $a = \rho_s / \rho - 1$ (ρ_s — плотность наносов, кг/м³; ρ — плотность воды, кг/м³). Для наносов $a = 1,65$; v_* — динамическая скорость, $v_* = \sqrt{gHi}$, м/с; W — гидравлическая крупность, м/с.

По этому критерию с учетом гидрологического фактора М. А. Великанов все реки разделил на пять категорий: реки наибольшей устойчивости; реки, устойчивые в плане; реки с относительно устойчивыми берегами; реки наименьшей устойчивости и селевые потоки — и дал им характеристику. С. Т. Алтунин предложил реки представить в виде трех групп: блуждающие, неустойчивые и устойчивые, а ширину (м) устойчивого русла определять по зависимости

$$B = AQ^{0,5}/i^{0,2}, \quad (7.2)$$

где A — параметр устойчивости; Q — руслоформирующий расход, м³/с; i — уклон водной поверхности.

Устойчивость отдельных участков рек предложено характеризовать также параметром кинетичности (числом Фруда)

$$Fr = \alpha v^2 / gH, \quad (7.3)$$

где α — коэффициент распределения скоростей по сечению; v и H — скорость и глубина реки при руслоформирующем расходе.

На основе длительных исследований были сформулированы отдельные элементы теории руслового процесса. Предлагаемые классификации рек стали связывать с типами руслового процесса.

Н. Е. Кондратьев, И. В. Попов (авторы основ гидролого-морфологической теории руслового процесса) установили типизацию речных русел: меандрирующие реки, реки с ограниченным меандрированием; однорукавные немеандрирующие реки; разветвленные русла. Каждому из типов дали развернутую характеристику, ввели понятие о дискретности руслового процесса и связанное с ним представление о структурных уровнях: отдельная твердая частица наносов, микроформы, мезоформы и макроформы.

Некоторые факторы, ограничивающие русловый процесс. В развитии руслового процесса происходит укрупнение фракционного состава русловых отложений, то есть образуется *отмостка русла*. В дальнейшем активность руслового процесса на этом участке снижается.

Другим фактором, ограничивающим развитие руслового процесса, является скальное ложе, в котором река прорезала себе русло; имеются и другие примеры того, как на отдельных участках русловый процесс настолько незаметен, что кажется, что нет никаких признаков его.

В. С. Лапшенков предлагает девять типов русл рек (четыре основных и остальные — вспомогательные) с различными морфологическими характеристиками на основе различных качественных и количественных условий проявления внешних причинных факторов руслообразования. В классификации в качестве основных признаков приняты характеристика русла, деформации берегов, наличие отмостки (в начальном состоянии русла), характеристика пойменных отложений, процессы на пойме, руслообразующие фракции наносов, а также фон и интенсивность русловых процессов.

При проектировании гидротехнических сооружений на реках выполняют расчеты морфологических элементов русла для естественного состояния (без сооружений) и для русла с сооружениями. Методической основой таких зависимостей являются: динамическое равновесие потока (обычно записывают в виде формулы Шези), транспортирующая способность потока (или размывающая) и характеристика формы поперечного сечения. На этой основе имеются морфометрические зависимости при руслоформирующем расходе Q для средней глубины потока h , уклона свободной поверхности i и других факторов. Методика расчетов по таким зависимостям изложена в специальных работах по русловой гидравлике.

7.1.3. ОСНОВНЫЕ ВИДЫ ДЕФОРМАЦИИ РУСЛ И ИХ ПРОГНОЗИРОВАНИЕ

Характер деформаций, возникающих в русле под действием постоянно текущей воды, чрезвычайно разнообразный. Существует деление русловых деформаций на два основных вида.

Общие деформации русла — это изменения размеров и положения в пространстве речного русла, обусловленные работой потока по размыву, транспорту и отложению наносов, в развитии которых принимает участие как бы весь поток, их механизм включает в себя элементы всего потока.

Местные деформации русла ограничены в пространстве и во времени и направлены под действием тех же факторов к возникновению отдельных русловых образований.

Следствием развития общих деформаций может быть направленное изменение уровней воды в русле, в результате развития местных деформаций русла обычно не наблюдается значительного изменения уровней потока.

С водосборного бассейна в русло поступают наносы различной крупности. Наиболее простой механизм общих русловых деформаций в естественных условиях — вековой аккумулятивный процесс. Наносы достаточно большой крупности не могут перемещаться ниже определенного створа, это приводит к их

накоплению выше этого створа и подъему отметок русла. Местные деформации могут развиваться на этом фоне, например возникновение размыва берега, сложенного легко размываемыми грунтами под влиянием скопления наносов. Таким образом, в русле появляются перемежающиеся узкие и широкие участки. Другие примеры местных деформаций: намыв участка берега вследствие перестройки кинематической структуры потока, деформации русла под воздействием построенного сооружения (водозабора, мостовых опор, бун или полузапруд и др.).

При проектировании различных речных сооружений очень важно иметь достаточно полное представление как о сложившемся состоянии русла (то есть об основных тенденциях направления руслового процесса) на данном участке, так и об изменениях в направлении русловых преобразований в связи со строительством сооружения или гидроузла. Прогноз позволит обеспечить высокую надежность проектируемых сооружений и улучшение технических решений и технико-экономических показателей.

При строительстве гидроузлов имеют место интенсивные общие деформации русла вследствие существенных изменений водного режима (расходов уровней), наносного режима и т. п.

Анализ существующего состояния русла и прогноз ожидаемых деформаций в зависимости от целей и технического решения проекта позволяют решить ряд конкретных задач. Например, оценка устойчивости берега в зоне размещения берегового сооружения; выбор основных размеров водосбросных сооружений гидроузла на базе определения ширины устойчивого русла и его средней глубины, установление характеристик наносного режима ВБ и НБ гидроузла и прогноз деформаций русла в обоих бьефах, расчет местного размыва у опор моста, основания бун и шпор и др.

7.2. МЕТОДЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ РУСЛ

7.2.1. НЕКОТОРЫЕ ОБЩИЕ МЕТОДЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ РУСЛ

Регулирование первичного стока на водосборе. Интенсивный процесс элементарного (первичного) стока имеет место при активном таянии запасов снега на водосборе в весенний период и в период обильных дождей. Ускоренный процесс первичного стока вызывает целый ряд нежелательных явлений как на водосборе, так и в реке, а именно: разрушение почвенного покрова, смыв почвы и даже верхнего слоя грунта; выщелачивание почвы, то есть растворение и вынос из нее ценных минеральных солей; развитие на водосборе отрицательных форм рельефа (рытвин, оврагов и др.), вынос смытого грунта в речные доли-

ны или водохранилища, обмеление рек (как следствие всего перечисленного), заилие водохранилищ; уменьшение меженного питания рек.

Регуляционные мероприятия на водосборе, направленные на перераспределение первичного стока с уменьшением объема поверхностного стока за счет перевода его части в подземный путем усиления просачивания воды в грунт, приводят к замедлению стока по времени и защите водосборных площадей от эрозии. Их подразделяют на агротехнические, культуртехнические и гидротехнические.

Агротехнические мероприятия направлены на создание и поддержание структуры почвы, обеспечивающей ее водопроницаемость, путем соответствующей ее обработки (в том числе пахота поперек склона, нарезка по горизонталям широких и глубоких бессточных борозд) и применение соответствующих севооборотов, установки щитов и организации лесных полос для снегозадержания.

Культуртехнические мероприятия проводят для обеспечения сохранности тонкого растительного покрова от вытаптывания скотом и улучшения культурного состояния поверхности водосбора путем залужения обнаженных склонов и облесения.

Гидротехнические мероприятия: создание верховых водохранилищ, задерживающих сток, что важно особенно для лесостепной и степной зон с усиленным поверхностным стоком и водной эрозией; возведение водозадерживающих валов; террасирование склонов (разбивка территории на систему пологих террас с укрепленными крутыми откосами); устройство вдоль горизонталей склона каналов (бессточных или со стоком), собирающих сток от таяния снега или ливней, с посадкой деревьев или кустарников по бермам.

Борьба с оврагами. Овраги — отрицательные формы рельефа в виде крупных глубоких промоин с многими разветвлениями, возникающими вследствие эрозионной деятельности снеговых (талых) и дождевых вод. Основные мероприятия по борьбе с оврагами направлены на предотвращение их роста и заключаются: в регулировании первичного стока на водосборе; устройстве нагорных канав для перехвата поверхностного стока на пути к оврагу, возведении сопрягающих сооружений (мощеных лотков, быстротоков, перепадов) для безопасного спуска воды в овраг; закреплении русла водотока, протекающего по дну оврага, донными порогами. Рекомендуются в дальнейшем уплачивать склоны оврагов и закреплять их одерновкой.

Небольшие овраги можно засыпать после перехвата поверхностного стока перед ними.

Борьба с селями. Сель — это относительно кратковременный огромной разрушительной силы паводок с очень большим со-

держанием в потоке минеральных частиц и обломков горных пород (до 75% общей массы потока). Сели (грязекаменные и водокаменные потоки) возникают или в результате ливней, или бурного таяния снега в бассейнах малых горных рек и сухих логов со значительными уклонами тальвега при наличии больших скоплений продуктов выветривания. Борьба с селями направлена на предотвращение причин их возникновения:

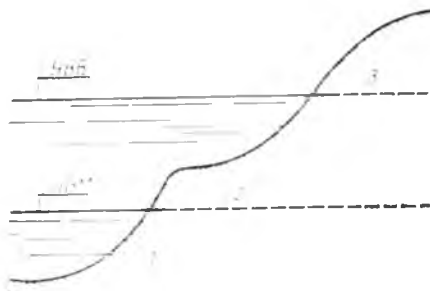


Рис. 7.1. Три высотные зоны русла для проведения берего- и дноукрепительных работ: нижняя (1), средняя (2) и верхняя (3)

регулирование первичного стока на водосборе; предотвращение образования селей с помощью службы наблюдения и оповещения (отмечают скопления продуктов и принимают меры к их безопасному сбросу в ближайшую реку), а также на ослабление разрушающего воздействия селей: строительство селехранилищ (наподобие водохранилищ) — емкостей, поглощающих селевой поток.

Берего- и дноукрепительные работы. Их проводят для защиты культурных земель, пастбищ, дорог, построек от размыва, для закрепления кромки берега, входящего в состав выправительной трассы, для предотвращения размыва оснований русловых и береговых сооружений (в том числе и регуляционных). Различают три высотные зоны берега, которые в период эксплуатации находятся в различных условиях, что определяет тип сооружения (покрытия) и условия производства работ (рис. 7.1):

нижняя — ниже уровня низкой межени УНМ. Это зона подводных креплений, в качестве которых применяют каменную наброску отсыпкой в воду, откатку тяжелых фашин с пригрузкой камнем или без нее, маты (покрывала) плетеные, хворостяные и др. Особое внимание обращают на недопущение подмыва одежды;

средняя — от уровня низкой межени до уровня высоких вод (УВВ), для нее характерно то, что она не все время находится под водой, поэтому возможно производство работ насухо. Для креплений используют материалы, хорошо работающие в условиях переменного смачивания. Широко применяют растительные крепления (одерновку, хворостяную выстилку, плетеные хворостяные маты и другие прорастающие крепления), сетчатые покрытия, мощение (одионочное, двойное в плетневых клетках),

ния гидравлических сопротивлений русла: удалением из русла и с поймы древесной и кустарниковой растительности (что не всегда желательно по ряду причин), очисткой русла от камней, попавших в русло при ледоходе или обвале берега, карчей (затопленных бревен); срезкой различного рода выступов в русле, смягчением поворотов, ликвидацией сооружений в русле, вызывающих подпор (без ущерба для хозяйственных интересов): гатей, рыбных, заколов, мельничных плотин и т. п.; ликвидацией ледяных заторов и др. При спрямлении речных петель (меандров) увеличивается уклон потока, и паводковый расход проходит на спрямленном участке с уровнями, меньшими, чем до спрямления, однако это мероприятие должно использоваться продуманно после исследований и расчетов.

Уменьшение расхода путем разгрузки русла снижает уровни на заданном участке. Разгрузочный канал трассируют из реки выше защищаемого участка, что позволяет отводить воду или в соседний бассейн (реку, озеро, море), или транспортировать ее на близлежащие территории, где она либо просто испаряется, либо ее используют для орошения или возвращают в ту же реку, но значительно ниже защищаемого участка.

7.2.2. ОБЩЕЕ РЕГУЛИРОВАНИЕ РУСЛА ИЛИ ВЫПРАВИТЕЛЬНЫЕ РАБОТЫ

Рассмотренные ранее вопросы регулирования русел относились к частным видам регулирования, когда в большинстве случаев предусматривались мероприятия по предотвращению местных деформаций его, например размыва берега и др. Но возможны случаи, когда такие мероприятия не дают ожидаемого эффекта и необходимо целенаправленное преобразование русла на участках значительной протяженности. Такие работы называют выправительными. Общая задача выправительных работ — создание русла потока взамен существующего, удовлетворяющего определенным требованиям (судоходство, мелиорация, лесосплав и т. п.), при минимальных эксплуатационных затратах. Выправительной трассой принято считать очертание проектируемого русла по урезу воды при принятом расчетном уровне. Схематический план выправительной трассы, нанесенной на очертание существующего русла с показом необходимых работ и сооружений, представлен на рисунке 7.3. Порядок проектирования выправительной трассы включает следующие работы.

Назначение и выбор оси трассы. Ось трассы принимают криволинейно изогнутой в плане, такое положение характерно для устойчивых естественных участков реки. Наиболее подходящий тип кривой с переменным радиусом кривизны для оси трассы — синусоида, которая обеспечивает постепенный плав-

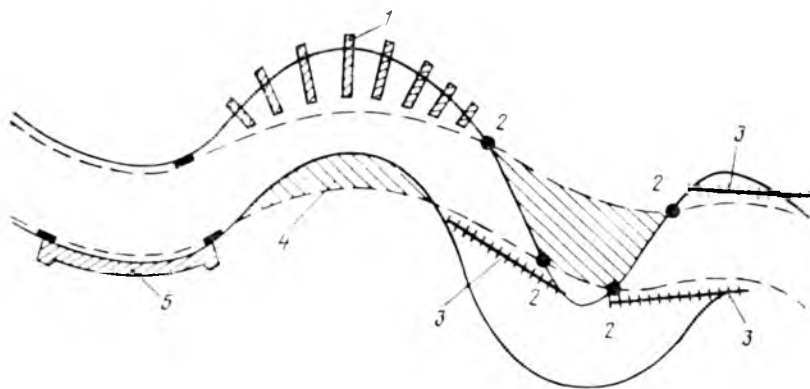


Рис. 7.3. Схематичный план выправительной трассы:

1 — поперечные выправительные сооружения; 2 — кромки землечерпательных прорезей; 3 — продольные выправительные сооружения; 4 — участок срезки берега; 5 — бетонная опояска

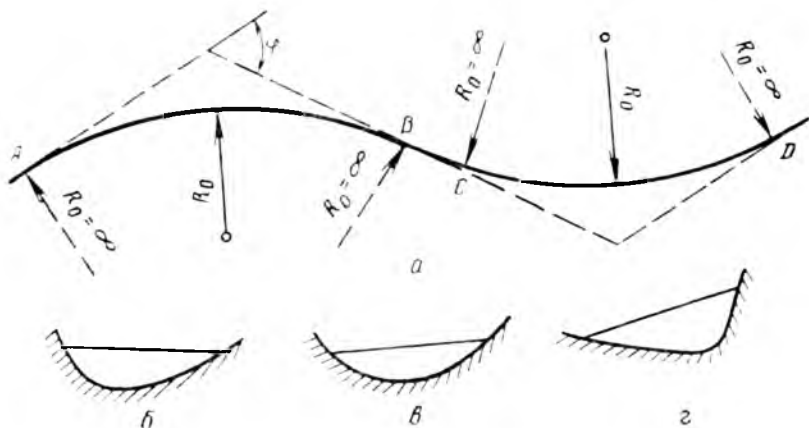


Рис. 7.4. Ось выправительной трассы (a) и поперечные сечения русла на участках АВ (б), ВС (в) и CD (г):

R_0 — радиус угла поворота русла; φ — угол поворота

ный переход от одного поперечного сечения русла к другому (рис. 7.4). Между криволинейными участками разных знаков могут быть прямолинейные короткие вставки (участок ВС на рис. 7.4). При назначении оси трассы желательно использовать устойчивые участки существующего русла, что снижает объемы земляных работ при строительстве.

Проектирование поперечных сечений русла. При разработке гидравлических элементов русла по выправительной трассе необходимо: соответствие ширины и глубины русла хозяйствен-

ным (эксплуатационным) условиям, например обеспечению суходождства или др.; постоянство скоростей течения (в крайнем случае плавное увеличение скорости вниз по течению); устойчивость русла против размыва; соответствие заложения откоса поперечного сечения типу грунта.

Поперечное сечение для прямолинейных участков принимают симметричным (параболическое, полигональное и т. п.), для криволинейных — несимметричным. За расчетный расход берут руслоформирующий, вычисленный по С. Т. Алтунину (Q паводковое обеспеченностью 3...10%) для рек Средней Азии или по Н. И. Макавееву ($Q_{2...3\%}$) — для рек Среднерусской возвышенности.

Поверочный гидравлический расчет. Его проводят для увязки уровней различных участков выправительной трассы. В результате поверочного расчета иногда приходится перепроектировать поперечные сечения некоторых соседних участков, иногда рассчитать кривые подпора или спада соседних участков для обеспечения совпадения уровней.

Проверка устойчивости запроектированного русла. В связи с некоторой условностью гидравлических расчетов для русел с деформируемым ложем необходима проверка устойчивости запроектированного русла. Полученные элементы русла (ширину, глубину и пр.) сопоставляют с аналогичными для устойчивых участков русла данной реки или для проверки пользуются рекомендациями по параметрам устойчивого русла (С. Т. Алтунина, В. Г. Глушкова, Ю. А. Ибад-Заде). Проверяют также неразмываемость русла у оснований выправительных сооружений, незаилаемость и транспортирующую способность русла в отношении наносов.

Выбор и назначение выправительных сооружений. Как указывалось ранее (см. рис. 7.3), в состав выправительной трассы входят, кроме участков существующего русла (участки незакрепленные), участки существующего русла, закрепленные береговыми опоясками, участки нового русла в виде прорези, участки русла, образованные с одной стороны срезкой берега, с другой — сооружениями (продольными или поперечными). Поэтому выбор типа этих сооружений, их проектирование и расчет представляют собою большой самостоятельный раздел проектирования выправительных работ. Подробнее сооружения для выправительных работ будут рассмотрены ниже.

7.2.3. НЕКОТОРЫЕ СПЕЦИАЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ РУСЛ

Регулирование русл рек-водоприемников. К водоприемникам относятся реки, в которые сбрасывают дренажные воды осушительных систем. Такие реки должны иметь устойчивые бе-

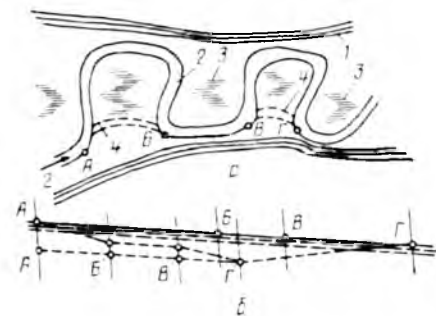


Рис. 7.5. Схема временного спрямления участка реки-водоприемника:

а — план; б — совмещенные продольные профили; 1 — склоны долины; 2 — русло; 3 — заболоченные участки поймы; 4 — спрямляющие прорезы

рега, а уровни воды (в меженный период) и пропускную способность — обеспечивающие прием воды из коллекторов дренажных систем. Простейший путь снижения уровней и увеличения пропускной способности — это спрямление русла (рис. 7.5).

При проведении спрямления на больших по протяженности участках реки, решая задачу отвода дренажных вод с осушаемой территории, можно получить отрицательный эффект в плане охраны водных ресурсов, ибо весенний сток

по укороченному руслу с существенно повышенными уклонами стечет за короткий промежуток времени, меженный сток сократится и река в межень превратится в ручей, иногда пересыхающий. В этом случае проводят комплекс выправительных работ для целей осушения (см. предыдущий раздел). Нужно иметь в виду, что регулирование рек-водоприемников на рассматриваемом участке благоприятно влияет на режим уровней и расходов вышерасположенного неотрегулированного участка реки.

Снижение уровней воды в реке в межень для обеспечения быстрого опорожнения поймы от весенних паводковых вод с целью увеличения продуктивности плодородных пойменных земель можно добиться углублением русла на значительном по длине участке, используя размывающую энергию речного потока в паводок, ограничив пропускную способность поймы, или систему лесных или кустарниковых посадок или систему дамб. При этом необходимо хорошо проанализировать работу водостеснительных сооружений, чтоб не получить отрицательного эффекта в виде размыва коренного берега или др.

Пропускная способность русл рек-водоприемников, сложенных торфом, несколько повысится, если следить за тем, чтобы русло было призматической формы, то есть постоянно его расширяя.

Создание водохранилищ в зоне избыточного увлажнения в верховьях рек-водоприемников при соответствующих геологических условиях позволяет уменьшить как высоту паводка, так и продолжительность его прохождения, а это положительно сказывается на качестве заливных лугов. Уровни реки в межень можно регулировать попусками из водохранилища. Такие водохранилища играют положительную роль при недостаточной

пропускной способности русла (малые уклоны и поперечные сечения), когда в период активного снеготаяния больших концентраций снега на водосборе паводковые воды становятся одной из причин заболачивания пойменных земель.

Все эти мероприятия, особенно комплексные, необходимо решать на основе технико-экономических расчетов.

Регулирование русл при бесплотинном водозаборе. Деформации русл в районе бесплотинного водозабора происходят при изменении режима уровней и расходов в связи с боковым отводом части расхода реки. Выше створа водозабора при эрозионном процессе в русле наблюдается размыв дна, а ниже водозабора — снижение уровня воды. В водозабор привлекается большой объем донных наносов. Если удастся каким-то образом не допустить их попадание в водозабор, то ниже створа нагрузка потока наносами увеличивается, а транспортирующая способность потока снижается и становится меньше бытовой, что приводит к отложению наносов.

Регуляционные сооружения в этом случае должны решить: подачу в магистральный канал расхода согласно графику водопотребления, меры борьбы с наносами (иногда со льдом и шугой); защиту регулятора и участков берега от размыва; создание благоприятного режима потока у регулятора. Расчетный расход водозабора обеспечивают поддержанием соответствующих уровней в реке, подача воды, таким образом, зависит от бытового уровня в реке.

Отвлечение донных наносов от водозаборного сооружения осуществляют плавучими струенаправляющими системами, схема одной из них показана на рисунке 7.6. Благоприятный режим потока перед регулятором отчасти может быть обеспечен водозахватной шпорой, выдвинутой в поток, которая при скорости в потоке более 1 м/с создает перед входом в регулятор дополнительный подпор. Если шпора недостаточно эффективна, то вместо нее делают косо расположенный донный порог. Он ограничивает размыв дна перед водозабором, является небольшим ограничителем для поступления наносов и создает небольшой подпор перед регулятором. При устройстве водозабора на берегу многорукавного русла закрывают рукава, имеющие тенденции к отмиранию.

Имеются другие пути защиты водозаборного сооружения от подмыва потоком: укрепление берега перед водозаборным регулятором системой шпор и усилением оголовка водозаборного регулятора (рис. 7.7, а), закрепление вогнутого берега стенкой или береговой опояской (рис. 7.7, б), дамбой (рис. 7.7, в), а также отвлечением части расхода специальной прорезью (рис. 7.7, г).

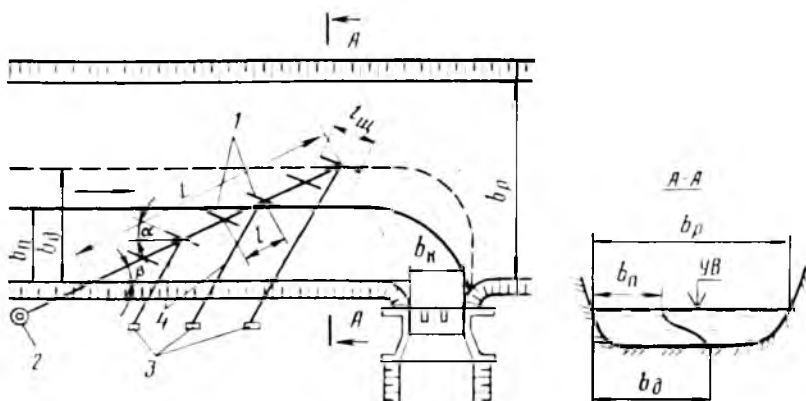


Рис. 7.6. Струенаправляющая система у плотинного водозабора:

1 — струенаправляющие щиты; 2 — ворот; 3 — лебедки; 4 — тросы; b_p — общая ширина русла; b_n — зона перемещения донных наносов; $b_{\text{по}}$ — зона поверхностных токов; b_k — ширина регулятора; $l_{\text{щ}}$ — длина одного направляющего щита; l — расстояние между щитами; L — общая длина струенаправляющей системы; α — угол между плоскостью щита и осью канала; β — угол между осью канала и осью струенаправляющей системы

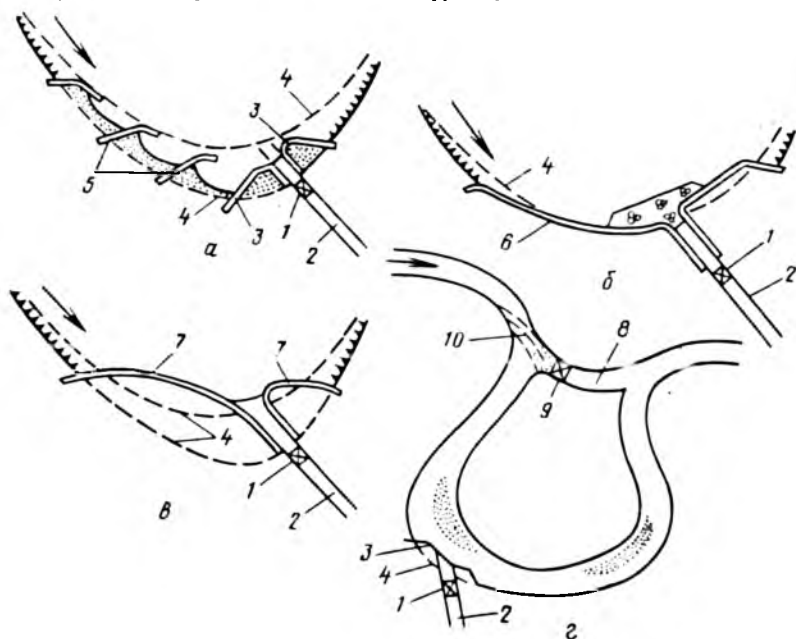


Рис. 7.7. Мероприятия по защите водозабора от подмыва:

а — применение шпор; б — закрепление кромки берега; в — использование дамб для создания нового очертания береговой линии; г — отвлечение части расхода прорезью; 1 — водозаборный шлюз; 2 — магистральный канал; 3 — укрепление оголовка; 4 — линия бровки берега; 5 — шпоры; 6 — береговая опояска; 7 — дамбы защитные; 8 — прорезь; 9 — регулятор в прорези; 10 — криволинейные пороги

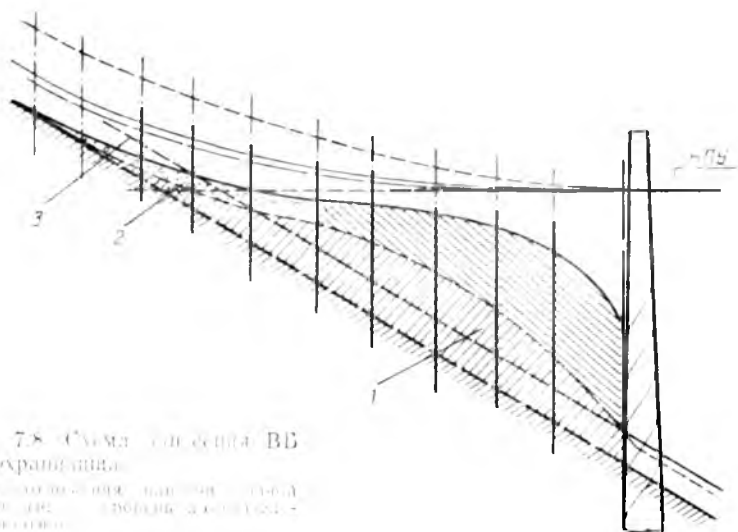


Рис. 7.8. Схема регулирования ВВ
водохранилища.

1 — первоначальный профиль дна;
2 — профиль дна после заиления;
3 — плотина.

Регулирование водохранилищ и подпертых бьефов. В процессе эксплуатации гидроузлов в ВВ водохранилищ и подпертых бьефов происходит активное отложение наносов (рис. 7.8) вследствие резкого уменьшения скоростей потока перед плотинной (в водохранилищах эти скорости могут быть нулевыми); последствия заиления водохранилищ отрицательны, ибо сокращается полезный объем. При борьбе с заилением водохранилищ большое значение придают всему комплексу противоэрозионных мероприятий (агротехнических, культуртехнических, гидротехнических) на территории водосбора, что резко уменьшает поступление наносов с водосбора и способствует сохранению плодородия его почв. При борьбе с заилением прудов (малых водохранилищ) эти мероприятия имеют особое значение, задержание наносов в оврагах и вышерасположенных балках осуществляют посадкой кустарников (создание «илофильтров»). Поступление наносов в водохранилище из русла реки с обилием в потоке песчаных фракций можно уменьшить или вообще прекратить, если выше построить другое водохранилище, которое будет перехватывать песчаные наносы, транспортируемые руслом. Уменьшение поступления наносов в водохранилище из русла возможно и при снижении транспортирующей способности потока, посадкой влаголюбивых кустарников и деревьев на пойме и осередках или установкой преград из железобетонных свай или тетраэдров. Искусственное расчленение потока на несколько отдельных рукавов, энергия которых в сумме будет меньше энергии потока до разделения, также может уменьшить поступление наносов в водохранилище из русла реки.

Стимулирование транзитного пропуска наносов через водохранилище в начальный период эксплуатации (или пруда) в качестве профилактической меры основано на том, что взвешенные наносы состоят на 70...80% из мелких частиц с очень малой гидравлической крупностью. Эти наносы обычно в самый начальный период эксплуатации в первый год достигают гидроузла, поэтому они могут быть направлены в НБ, если паводковые расходы сбрасывать из нижних слоев через водослив с приспособлением в виде наносозахватывающего тракта (см. гл. 11) или через донные отверстия плотины. Так же можно промывать водохранилища или подпертый бьеф от мелких наносов.

Регулирование русла подпертого ВБ низконапорного плотинного гидроузла имеет свои специфические особенности. Здесь водосбросную плотину проектируют с низким порогом, поэтому регулярная промывка ВБ в соответствии с имеющимися рекомендациями обеспечит удаление значительного объема отложившихся наносов. Кроме того, проектирование русла ВБ в виде плавно сужающейся воронки с помощью струенаправляющих дамб, применение косых донных струенаправляющих порогов и другие мероприятия улучшают режим работы ВБ и обеспечивают промывку его от наносов.

Регулирование русл в НБ водохранилищ и подпертых бьефов. В НБ водохранилищных гидроузлов наблюдается общий размыв дна при поступлении переосветленного потока, так как в ВБ имеет место активная аккумуляция. Это приводит к понижению дна и уровней воды, которое распространяется на значительные расстояния и отрицательно влияет на работу расположенных ниже гидроузла насосных станций, водозаборных и других сооружений.

Наибольшее понижение дна и уровней воды отмечают у гидроузла, далее этот процесс по мере насыщения потока наносами ослабевает. При увеличении поступления наносов в НБ (то есть по мере занесения водохранилища) этот процесс ослабевает. Профилактические промывки водохранилища, стимулирование транзитного хода наносов через водохранилище в НБ позволяют влиять на размыв дна НБ, то есть несколько ослабляют его. Размыв НБ прекращается, когда устанавливается равновесие — количество поступающих наносов в водохранилище равно количеству, сбрасываемому в НБ.

В НБ плотинных низконапорных водозаборных узлов в процессе эксплуатации русло обычно заносится наносами и тем активнее, чем выше процент водозабора. При этом происходят подъем дна русла, а соответственно и уровней воды в НБ, сопровождающийся подтоплением прилегающих территорий, блу-

ждение русла на участке занесения и другие нежелательные явления.

Небольшое положительное значение могут иметь промывки ВБ, которые отчасти способствуют промыву НБ (большие скорости потока, его высокая транспортирующая способность), однако всей проблемы они не решают. Проектирование отводящего (НБ гидроузла), относительно узкого участка, ограниченного струенаправляющими дамбами (или коренным берегом и струенаправляющей дамбой), который обеспечивает при прохождении паводковых расходов промывку НБ, и организация кратковременных попусков в НБ в неполивной период (когда имеется вода для этих целей) позволяют несколько улучшить условия работы НБ.

Гидротехнические мероприятия на малых и средних равнинных реках. Малые реки (длиною до 200 км, с площадью водосбора менее 2000 км²) и средние (площадью водосбора до 50 тыс. км²) — это ценные объекты производительных сил природы. Они бывают самостоятельные или входят в бассейн крупной реки. Имеется немало примеров ухудшения их состояния из-за сокращения площадей леса на водосборе и по берегам, возрастания загрязнения, нарушения эрозионной устойчивости почвы, распашкой крутых склонов и пойменных земель, разработки и изъятия из русла для нужд строительства песка, гравия и др.

Поэтому такие реки нуждаются в мероприятиях, обеспечивающих сохранение и повышение продуктивности их в пределах природных возможностей. *Охранные мероприятия* направлены на ликвидацию причин, ухудшающих ее режим и состояние.

Хозяйственные мероприятия проводят для увеличения продуктивности реки, поймы и надпойменных террас. Они включают и мероприятия на водосборе, рассмотренные ранее.

В хозяйственные мероприятия также входит: создание регулирующих водохранилищ (в верховьях), хозяйственных и рекреационных прудов и водоемов, обеспечение затопления поймы весной и увлажнение ее в межень, создание условий для нереста рыбы, устройство рыбоводных прудов. Необходимо заметить, что хозяйственные мероприятия эффективны в сочетании с рекультивационными.

Рекультивационные мероприятия — мероприятия, улучшающие режим реки и ее сохранность. К ним можно отнести:

выделение водоохраных зон в составе поймы, склонов долины, оврагов, балок и прибрежных полос, на которых будет осуществляться особый режим хозяйствования. В прибрежной зоне всякая хозяйственная деятельность должна быть запрещена;

увеличение расходов воды в половодье за счет особых попусков из водохранилищ в верховьях для промыва русла;

задержание наносов перед руслом (в балках, оврагах и прудах с водовыпусками в реку), защита русла от овражных выносов;

увеличение транспортирующей способности русла в паводок за счет ограничения пропускной способности поймы;

закрепление слабых берегов биологическим креплением (посадка ивового кустарника);

периодические очистки русла от наносов механизмами;

экологические мероприятия и др.

Приведенные выше мероприятия (как хозяйственные, так и рекультивационные) обеспечиваются с помощью гидротехнических сооружений или выполнения соответствующих работ.

7.3. РЕГУЛЯЦИОННЫЕ СООРУЖЕНИЯ

7.3.1. СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ЭЛЕМЕНТЫ, КОНСТРУКЦИИ

Строительные материалы. Работы по регулированию русл обычно проводят на значительном протяжении реки, что требует больших объемов строительных материалов. Поэтому основную часть сооружений желательно возводить из местных строительных материалов с минимальным расходом привозных (цемента, металла и др.).

Грунты широко применяют на многих видах регуляционных сооружений. Гравелистые, песчано-гравелистые грунты используют как загрузочный материал тюфяков, габионов; песчаные — для намыва сооружений; супесчаные и суглинистые — для отсыпки дамб, бун, надводных частей сооружений; глинистые — для загрузки тюфяков и фашинной кладки. Торфяным грунтом заполняют промежутки между плетнями. Растительные грунты необходимы для улучшения прорастания и укоренения посадок. Требования к грунтам изложены в соответствующих нормативных документах.

Камень с объемной массой не менее $1,7 \dots 2,2 \text{ т/м}^3$, удовлетворяющей требованиям СНиП, используют для покрытия поверхности сооружений (берегоукрепительных в виде наброски или мощения), отсыпки тела сооружений, загрузки частей сооружения, выполненного из хвороста или дерева. Применяют камень булыжный, рваный, колотый, плотняк большинства пород, за исключением некоторых мергелистых известняков и глинистых песчаников, размягчающихся в воде или разрушающихся от морозов. Мелкие фракции (щебень, гравий) используют как подстилающие слои под крепления.

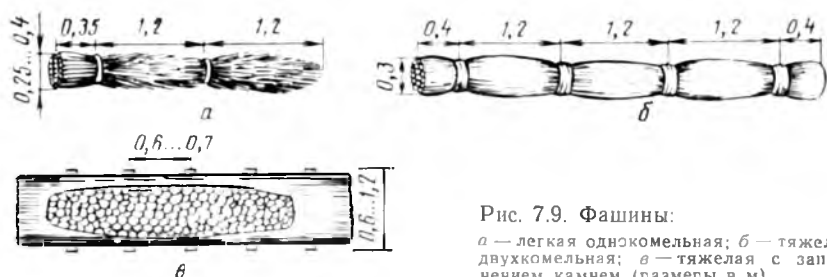


Рис. 7.9. Фашины:

а — легкая однокумельная; б — тяжелая двухкумельная; в — тяжелая с заполнением камнем (размеры в м)

Хворост — это срубленные стволы и ветви молодых деревьев и кустарников возраста 2...5 лет и их крупные побеги. Хворост должен быть гибким, прочным и вязким длиной не менее 1,5...2 м и толщиной в комле 3...5 см, обладать способностью к прорастанию. Применяют хворост хвойных и лиственных пород. Ивовые породы (их много разновидностей в разных районах) служат для хворостяных, вязальных конструкций.

Дерево — древесина в виде бревен, кольев, жердей и других изделий — широко используют в районах, богатых лесом. Колья служат для устройства плетней, пришивки прутяных канатов, делают их из твердых древесных пород толщиной 4...5 см, длиной до 1,2 м в зависимости от назначения.

Мох, солом, камыш, сеяные травы и другие растительные материалы применяют достаточно широко. Вязальные материалы — вицы из молодого хвороста ивовых пород (прямой хворост без ветвей толщиной до 1,25 см и длиной 1,5...2 м) — используют для вязки фащин и прутяных канатов; скрученное мочало — для перевязки сеток, фащин и прутяных канатов.

Из этих материалов выполняют простые конструкции: фашины легкие и тяжелые (рис. 7.9), прутяные канаты — легкие фашины бесконечной длины, легкие и тяжелые тьюфаки, хворостяные покрытия, каменно-хворостяная кладка, плетневые заборы, фашинная кладка, сипаи.

Металл (продукт индустриального производства в отличие от большинства из перечисленного) в виде гвоздей, болтов, скоб, проволоки, арматуры железобетонных конструкций находят широкое применение, хотя материал и дефицитен.

Цемент является составной частью бетона и грунтобетона [смеси из цемента (14...15 %), песка (70...72 %), глины (14...15 %)]. Используют цемент относительно невысоких марок: 200, 250, 300, 400.

Битум (составляющее асфальтобетона и грунтоасфальта), **асфальт, асфальтобетон** и **новые химические материалы** (пластмассовые, бризольные покрытия, полимеризующиеся смолы,

различные смеси) применяют для покрытия и укрепления береговых откосов.

Бетонные и железобетонные конструкции используют в виде монолитных и сборных элементов, ряжей.

В качестве строительного материала используют также металлическую сетку и габионы из нее (сетчатые ящики, заполненные камнем), гибкие сетчатые покрывала и многие другие конструкции.

Конструкции, создаваемые из перечисленных выше материалов, должны быть устойчивы против размыва (имеются данные по средним допускаемым скоростям и влекущей силе для различных креплений); против воздействия ледохода и ледостава; против сдвига и опрокидывания; иметь связность частей сооружения (недопущение разрыва при осадке, крене); не допускать вымыв грунта через тело сооружения; обладать сопротивляемостью гниению в условиях переменного увлажнения. Из приведенных материалов и элементов возводят множество сооружений, имеющих много классификаций. Ниже приведем некоторые из них.

По *характеру воздействия на поток*: массивные — взаимодействующие с потоком своей массой; сквозные (заилители) — пропускающие сквозь себя часть расхода потока; струенаправляющие — изменяющие кинематическую структуру потока и управляющие размывом и перемещением наносов.

По *расположению по отношению к оси потока* (направлению течения): продольные, поперечные, могут быть и промежуточного расположения.

По *сроку службы* — постоянные и временные.

По *отношению к горизонтам воды*: незатопляемые и затопляемые (переливные).

По *местоположению*: русловые и пойменные.

7.3.2. ОСНОВНЫЕ КОНСТРУКЦИИ СООРУЖЕНИИ

Массивные сооружения. Это продольные сооружения — дамбы, поперечные сооружения (буны-полузапруды, шпоры, запруды, донные полузапруды и запруды, донные пороги). Дамбы располагают вдоль потока, поперечный профиль их близок профилю плотин из грунтовых материалов.

По назначению дамбы бывают: частью береговой линии (ограждающие), отклоняющие динамическую ось потока из русла на пойму; перекрывающие вход в рукав, оказывающие регулирующее действие на поток в месте его деления или слияния.

По выполняемым функциям различают оградительные береговые, оградительные русловые, струенаправляющие (в гидроузлах дамбы). Поперечное сечение их выполняют в виде тра-

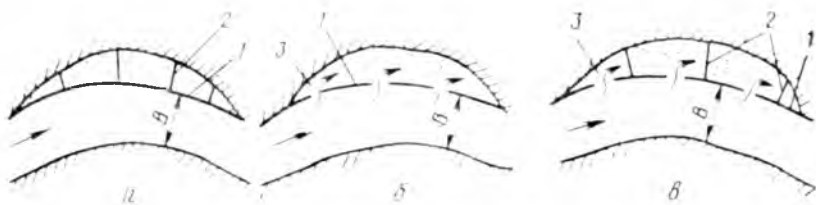


Рис. 7.10. Схемы размещения оградительных русловых дамб:

а — затопляемые с траверсами; *б* — незатопляемые с отверстиями; *в* — глаголеобразные буны; 1 — дамбы; 2 — траверсы; 3 — отверстия

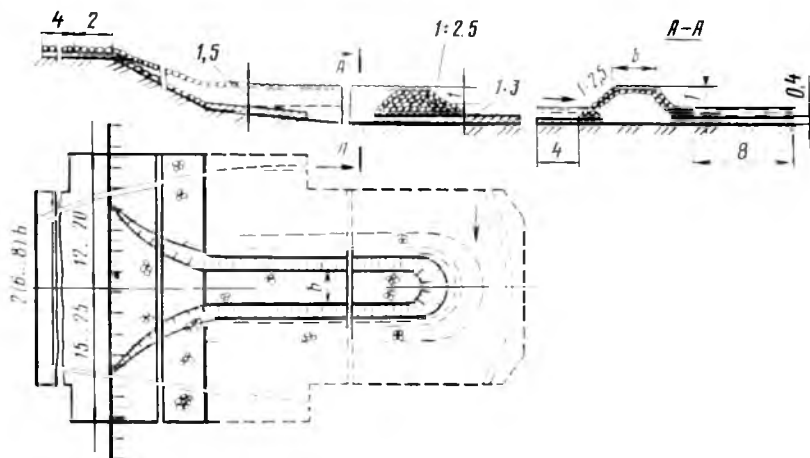


Рис. 7.11. Бунa из грунта и каменной наброски в голове с креплением гребня и откосов мощением (размеры в м)



Рис. 7.12. Сквозная свайная одиночная преграда и принципы ее работы: 1 — сваи; 2 — отложения наносов

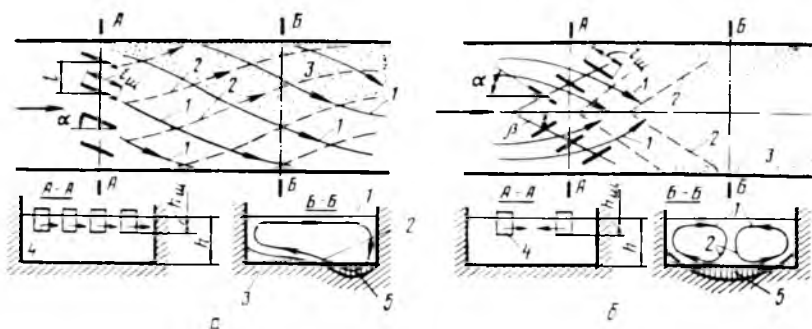


Рис. 7.13. Струенаправляющая плавучая система и ее воздействие на структуру потока:

а — защита от размыва левого берега; *б* — система для осевого размыва дна; 1, 2 — траектории винтовых течений (поверхностные и донные токи); 3 — отложения наносов; 4 — плавучий струенаправляющий щит; 5 — размыв дна; h — глубина потока; $h_{щ}$ — глубина погружения щита

печи, схемы размещения оградительных русловых дамб даны на рисунке 7.10.

Поперечные массивные сооружения — это полузапруды или буны, шпоры (рис. 7.11), выполняющие функции выправительных, защитных и водозахватных сооружений (в водозаборах бесплотинного типа).

Запруды служат для закрытия рукава или протока, донные запруды и полузапруды — для воздействия на поток в придонном слое (создавая дополнительную шероховатость и др.).

Донные пороги предназначены для фиксации (закрепления) отметок дна на заданном участке.

Сквозные сооружения. Они бывают стержневые — свайные (рис. 7.12), ветвистые, щитовые, каркасные, сетчатые и др. Работают они как заилители: поток преодолевает их с повышенными скоростями, а выходя в пространство между ними, резко снижает скорость, что ведет к осаждению наносов и постепенному занесению пространства между ними.

Струенаправляющие сооружения. Они вызывают в потоке искусственную поперечную циркуляцию (рис. 7.13), винтовой поток обладает повышенной транспортирующей способностью в отношении наносов.

Системы поверхностных (плавучих) щитов или донных щитов и порогов могут быть использованы для защиты бесплотинного водозабора от поступления в него донных наносов, для размыва дна русла, для защиты берега от размыва, для предохранения мостовых опор от подмыва, для борьбы со струйностью потока в охладительных прудах ТЭЦ и АЭС.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ

1. Какие нежелательные деформации русл бывают и в чем основная задача их регулирования?
2. Дайте понятие устойчивости русла и классификацию рек по устойчивости.
3. Каковы факторы, ограничивающие русловый процесс?
4. Расскажите об основных видах деформаций русл и их прогнозировании.
5. Какие мероприятия известны по регулированию первичного стока на водосборе?
6. Какие берего- и дноукрепительные работы на характерных участках поперечного сечения русла Вы знаете?
7. Каковы задачи и принципы борьбы с наводнениями?
8. Изложите принципы проектирования выправительной трассы.
9. Каковы особенности регулирования русл рек-водоприемников?
10. Расскажите об особенностях гидротехнических мероприятий по регулированию малых рек.
11. Каковы основные типы регуляционных сооружений и условия их применения?
12. Дайте краткую характеристику массивных, сквозных и струенаправляющих сооружений.

Глава 8. ВОДОЗАБОРЫ И ОТСТОЙНИКИ

Использование водных ресурсов во всех отраслях водного хозяйства предполагает отбор воды из водоисточника, очистку ее от плавающих тел и крупных фракций наносов и подачу с заданными расходами и напорами к месту использования.

Отбор воды осуществляют с помощью гидротехнических сооружений — *водозаборов*, в функции которых, кроме того, входит и предварительная ее очистка от плавающих тел, шуги, крупных донных наносов.

При заборе из водоисточников с большим содержанием наносов средних и мелких фракций возникает опасность заилиenia оросительных каналов, абразивного износа турбин и насосов, попадания твердых частиц в системы водоснабжения. Очистку воды от наносов в соответствии с технологическими требованиями водопользователей или водопотребителей выполняют специальными гидротехническими сооружениями, называемыми отстойниками.

8.1. ВОДОЗАБОРНЫЕ СООРУЖЕНИЯ, КЛАССИФИКАЦИЯ И ОСНОВНЫЕ ТРЕБОВАНИЯ К ВОДОЗАБОРАМ

Водозаборы можно классифицировать по следующим основным признакам:

по *виду водоисточника* они могут быть речными, озерными

(водохранилищными), морскими и каптажными (для забора грунтовых или подруслых вод);

по *способу приема воды* водозаборы делят на глубинные и открытые, донные, фильтрующие и инфильтрационные;

по *способу транспортирования воды* они могут быть самостоятельными и с машинной подачей. Последние, в свою очередь, подразделяют на стационарные и подвижные, совмещенные и раздельные.

Основные требования, предъявляемые к водозаборам:

обеспечение водоподачи в строгом соответствии с графиком водопотребления;

недопущение в водовод плавающих тел, льда и шуги, а также крупных фракций донных наносов;

возможность прекращения подачи воды в водовод на время его ремонта или обслуживания;

недопущение попадания рыбы в водовод, за исключением случаев, когда вода подается в крупные каналы, пригодные для рыбозаведения.

При расположении на реках и в составе гидроузлов комплексного назначения водозаборы, кроме того, не должны создавать помех судоходству, лесосплаву, проходу рыбы и т. д.

8.1.1. ВОДОЗАБОРЫ В СОСТАВЕ ВОДОХРАНИЛИЩНЫХ ГИДРОУЗЛОВ

Условия несбольших водохранилищ с малыми высотами ветровых волн благоприятны для работы водозаборов. Твердые частицы, поступающие с водой, по мере увеличения глубин и уменьшения скорости потока осаждаются, скапливаясь в придонной зоне; приносимые потоком чешуйки внутриводного льда в зоне малых скоростей всплывают, не засоряя решеток водоприемников. Здесь работа водозаборов осложняется в основном необходимостью защиты от плавающих тел, а также от ракушки дрейсены, обрастание которой вызывает рост шероховатости и уменьшение площади живого сечения водоводов.

На крупных водохранилищах дополнительные сложности в работе водозаборов, особенно расположенных вне гидроузлов, создают интенсивные ветровые вдольбереговые сечения (см. гл. 11), транспортирующие крупные наносы и способствующие образованию шуги, а также неустойчивость береговой линии, меняющейся под воздействием волн и вдольбереговых течений.

Водохранилищные водозаборы могут быть самостоятельными (см. рис. 8.1, 1...4) и с машинной подачей (5, 6). В свою очередь, самостоятельные выполняются глубинными — в теле бетонной или грунтовой плотины (2, 3) либо туннельными (4) и поверхностными — открытыми (1, рис. 8.1).

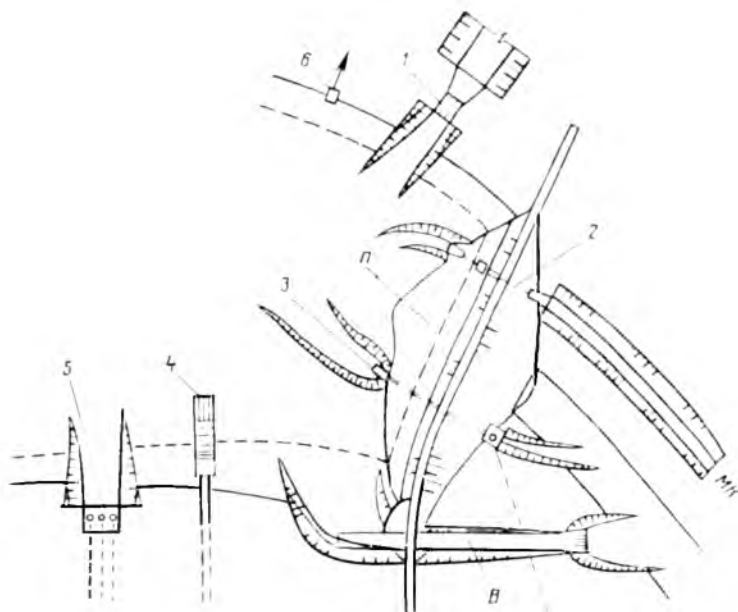


Рис. 8.1. Возможные типы водозаборов при водохранилищном гидроузле:

П — плотина; *В* — водосброс; *МК* — магистральный канал; 1 — открытый; 2 — трубчатый безнапорный; 3 — трубчатый напорный, совмещенный с водоспуском; 4 — туннельный; 5 — с машинным подъемом, стационарный; 6 — то же, подвижный

Водозаборы (водовыпуски) при грунтовых плотинах рассмотрены в главе 5.

Особенность мелиоративных водозаборов — необходимость забора из поверхностных, наиболее теплых и насыщенных кислородом слоев воды. Поэтому их устраивают с входными отверстиями, расположенными на разной высоте. Нижний ярус выполняют ниже УМО, так, чтобы обеспечить подачу заданного расхода во всем расчетном диапазоне колебаний уровней в водохранилище. Входные отверстия оборудуют очищаемыми решетками и рабочими затворами, выполняющими и функции ремонтных.

Одна из схем туннельного водозабора приведена на рисунке 8.2, *а*. В ней предусмотрен забор воды из верхних слоев с помощью трех ярусов затворов 1. Решетка 2 предотвращает попадание в водовод мусора и плавающих тел и требует систематической очистки. Камеру затворов выполняют так же, как в водосбросах, но она может иметь лишь один затвор 5, так как при заборе воды из верхних слоев аварийные ситуации менее опасны, чем при глубинных отверстиях. Воздуховод служит

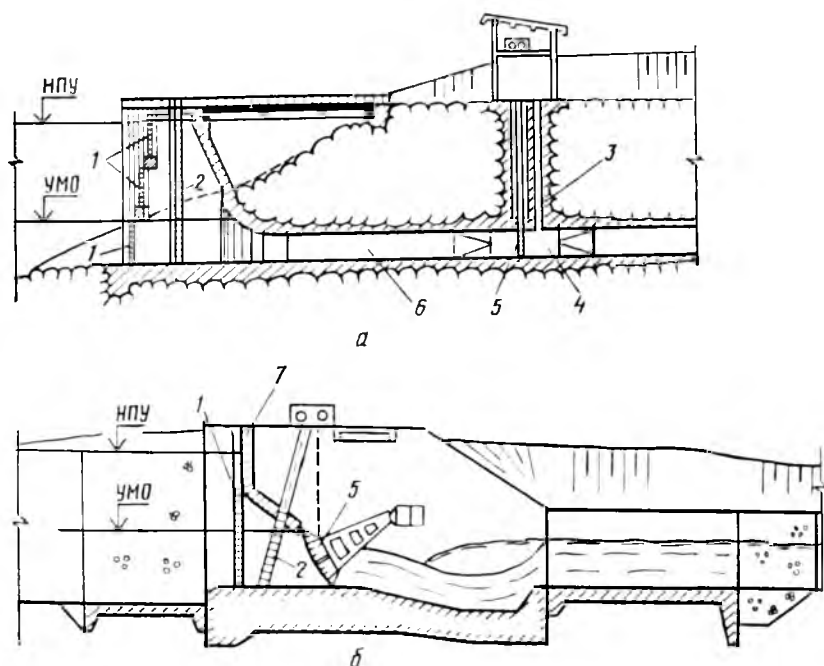


Рис. 8.2. Схемы водозаборов из водохранилищ:

а — туннельный (поз. 4 на рис. 8.1); *б* — открытый (поз. 1 на рис. 8.1); 1(*а*), 2(*б*) — затворы на входе (ремонтные); 2(*а*), 1(*б*) — решетка; 3 — воздуховод; 4 — камера затворов; 5 — рабочий затвор; 6 — водовод; 7 — диафрагма

для устранения или снижения вакуума за затвором при частичных его открытиях.

Поверхностные (открытые) водозаборы из водохранилищ со значительными колебаниями уровней выполняют чаще всего по типу диафрагмовых (рис. 8.2, *б*) или трубчатых регуляторов. Для защиты от попадания в канал плавающих тел при сработавшем водохранилище служит решетка 2. Поверхностный водозабор нужно располагать на участке берега, сложенном крепкими породами, способными противостоять размывающему воздействию волн, либо устраивать мощное крепление, предотвращающее размыв берега.

Водозаборы с машинной подачей строят при необходимости дополнительного подъема воды, если водохранилище не обеспечивает требуемой высоты командования, а также при заборе воды на хозяйственно-питьевые нужды. Они могут быть стационарными и подвижными (см. рис. 8.4). Схема стационарного водозабора совмещенного типа показана на рисунке 8.3, *а*.

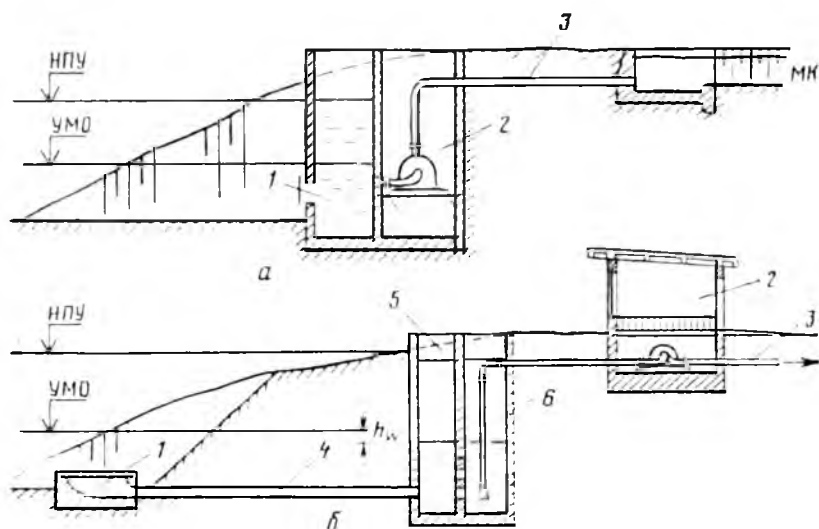


Рис. 8.3. Схемы водозаборов с машинной подачей:

a — совмещенного типа; *б* — раздельного типа; 1 — водоприемник; 2 — насосная станция; 3, 4 — напорный и самотечный трубопроводы; 5 — береговой приемно-сеточный колодец; 6 — всасывающая труба; h_w — потери напора в самотечном трубопроводе

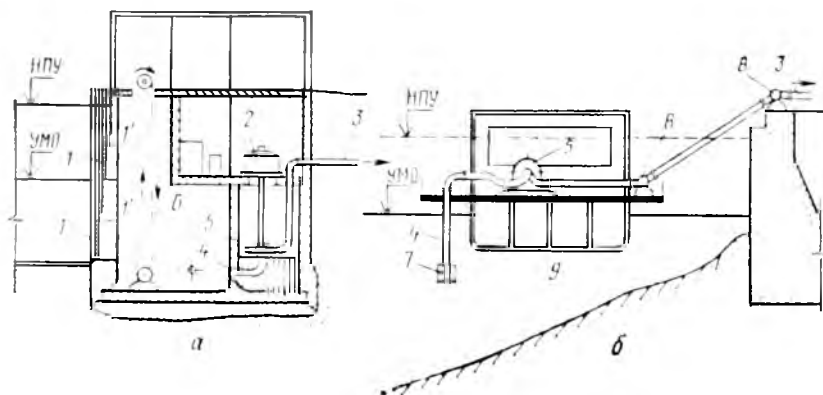


Рис. 8.4. Водозаборы с машинной подачей:

a — стационарный; *б* — подвижной (плавающий); 1 — затвор водоприемных окон (I'); 2 — электродвигатель; 3, 4 — напорный и всасывающий трубопроводы; 5 — насос; 6 — движущая сетка; 7 — решетка; 8 — подвижное соединение трубопровода; 9 — плавучий понтон

Здесь водоприемные отверстия (водоприемники) 1 выполнены непосредственно в корпусе водозабора, в котором смонтирована и насосная станция 2, подающая воду в напорный трубопровод 3, а затем в магистральный канал. При раздельном водозаборе водоприемник вынесен в водохранилище, часто довольно далеко, чтобы обеспечить забор воды вне зоны волнового взмучивания. В малых водохранилищах водоприемники можно располагать в придонной зоне, как это показано на рисунке 8.3, б; при больших глубинах их выполняют в виде вертикальных или наклонных труб-стояков с раструбом, забирающих воду на глубине не менее 1,5 м от поверхности. Водоприемник соединяют самотечным трубопроводом 4 с береговым колодцем 5, снабженным сетками для первичной очистки воды от мусора. В напорный трубопровод 3 воду подают из колодца насосами, размещенными в отдельно стоящем здании насосной станции 2. Эта схема позволяет разместить основные сооружения водозабора в удалении от уреза воды, не опасаясь их подмыва при изменении положения береговой линии, однако требует дополнительных затрат на строительство самотечного трубопровода и компенсацию потерь напора h_w в нем. Защитой от плавающих тел являются решетки в водоприемных отверстиях, а при большом количестве мелкого плавающего мусора — движущаяся сетка 6 (рис. 8.4, а).

Подвижный водозабор может быть выполнен в виде небольшой насосной станции, смонтированной на тележке и устанавливаемой непосредственно у уреза воды; станцию перемещают при изменении положения последнего. Водозаборы большей производительности делают плавучими, как показано на рисунке 8.4, б. Основой является пустотелый металлический или железобетонный понтон 9, на котором смонтировано оборудование насосной станции. Подачу в напорный трубопровод 3 осуществляют через шарнирные соединения 8, позволяющие понтону перемещаться по вертикали при изменении уровня воды в водоеме без нарушения напорной линии.

8.1.2. РЕЧНЫЕ ВОДОЗАБОРЫ

Особенность таких водозаборов — отбор воды из потоков с большим содержанием взвешенных и донных наносов и интенсивным шугообразованием, особенно на горных и предгорных реках. В речных водозаборах важное значение приобретает рыбозащита, так как вовлечение молоди в водозабор, приводя к ее гибели в насосах либо оросительных каналах младших порядков, наносит большой ущерб рыбному хозяйству.

Речные водозаборы могут быть с машинной подачей воды и самотечные. Первые по конструкции близки к машинным

водохранилищным водозаборами и выполняют их как стационарными, так и подвижными.

Самотечные водозаборы подразделяют на *бесплотинные*, когда воду забирают из естественного русла реки, а расходы и уровни воды в отводящем канале определяются бытовыми уровнями в реке, и *плотинные*, когда заданная отметка воды в канале обеспечивается плотиной, создающей подпор перед входом в водозабор.

Речные самотечные водозаборы могут быть открытыми, глубинными и донными, в том числе инфильтрационными, предназначенными для забора подрусловых вод. Если входное отверстие водозабора расположено перпендикулярно потоку, то водозабор называют *фронтальным*, в противном случае — *боковым* (рис. 8.5).

Часто речные водозаборы классифицируют по типу применяемых средств борьбы с наносами: с карманами, полками, промывными галереями и т. д.

Водозаборные сооружения рекомендуют устраивать на участке реки с устойчивым руслом, сложенным слаборазмываемыми грунтами, без отмелей и островов. С целью уменьшения вовлечения наносов водозабор устраивают на вогнутом берегу (см. рис. 8.5), вне зоны концентрации донных наносов, отбрасываемых донными токами к берегу выпуклому. Водоприемник располагают несколько ниже точки пересечения касательной (1—3) с вогнутым берегом по урезу паводка 1...3%-ной обеспеченности; при фронтальном водозаборе вход в него выполняют нормально радиальному сечению (0—3).

Важной характеристикой речных водозаборов является соотношение расхода, забираемого в канал (Q_k), и расхода реки (Q_p). Эту величину называют коэффициентом водозабора, и она может колебаться от нескольких сотых при машинном водозаборе почти до единицы (в плотинных водозаборах), когда практически весь меженный расход реки забирают на орошение. Для одного и того же водозабора этот коэффициент не постоянный, так как колебания расхода в реке значительно больше, чем изменения расходов канала.

8.1.3. САМОТЕЧНЫЕ БЕСПЛОТИННЫЕ ВОДОЗАБОРЫ

В простейшем случае такой водозабор представляет собой канал, отводящий часть речного расхода, как показано на рисунке 8.6, а. Он может быть нерегулируемым, когда гидравли-

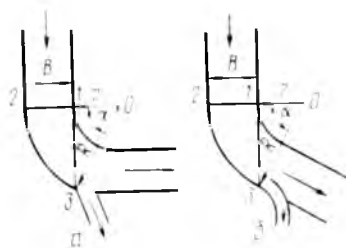


Рис. 8.5. Схема к выбору местоположения водозабора:

а — бокового; б — фронтального;
В — ширина русла

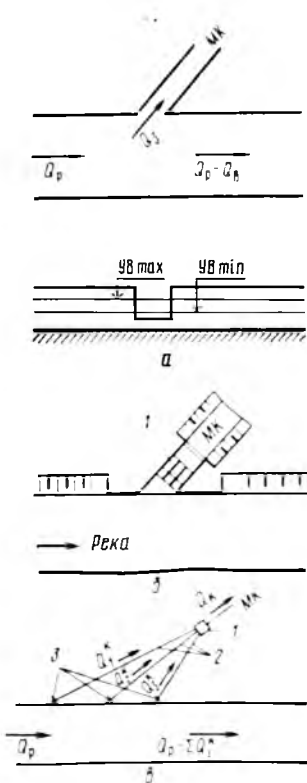


Рис. 8.6. Схемы бесплотинных водозаборов:
 а — нерегулируемый; б — регулируемый; в — многоголовый регулируемый; 1 — регулятор; 2 — каналы-прокопы; 3 — грунтовые перемычки

ческий режим в канале полностью определяется отметками бытовых уровней в реке, и регулируемым, то есть снабженным регулятором в головной части, позволяющим забирать воду в соответствии с графиком водопотребления (рис. 8.6, б). Очевидно, для этого график водопотребления должен с большим запасом вписываться в гидрограф реки. Применение бесплотинных водозаборов для мелиоративных целей наиболее удобно на реках со снежным и ледниковым питанием. В этом случае период прохождения максимальных расходов реки совпадает по времени с периодом максимального водопотребления. Поэтому такие водозаборы нашли широкое применение в предгорных районах юга страны.

Наиболее благоприятны для устройства бесплотинных водозаборов реки с невысокими берегами, сложенными слаборазмываемыми грунтами.

Здесь регулирующее сооружение в голове канала обеспечивает надежную работу при относительно небольших строительных затратах. Отсутствие сложных и дорогих сооружений позволяет эффективно использовать такие водозаборы и на реках с неустойчивыми, блуждающими руслами. При этом регулирующее сооружение располагают в отдалении от реки, а воду к нему подводят каналами-прокопами, устраивая головы их на некотором расстоянии друг от друга (рис. 8.6, в). При занесении одного из прокопов включают в работу следующий, разбирая грунтовую перемычку, отделяющую его от реки. Обеспечивая достаточно высокую надежность системы, многоголовый водозабор при одновременном включении нескольких голов позволяет увеличить, по сравнению с одноголовым, забираемый расход. Характерная особенность бесплотинных водозаборов — захват большого количества донных наносов: в процентном исчислении для схемы а (см. рис. 8.6) отбор их из реки почти вдвое превышает отбор воды.

Причину этого явления можно пояснить схемой на рисун-

ке 8,8, а. При устройстве бокового отвода линии тока I в реке искривляются, приобретая выпуклость в сторону противоположного берега. В потоке возникают центробежные силы, направленные от центра кривизны. (Качественно эта картина близка к ситуации, возникающей при движении потока в криволинейном русле, причем вход в водозабор оказывается как бы на выпуклом берегу.) В русле развивается искусственно возбужденная поперечная циркуляция с поверхностными струями 4, направленными от водозабора, тогда как донные токи 3 устремлены к нему, подтягивая наносы к входу в канал. Такая структура потока вызывает не только повышенный захват наносов, но и нестабильность положения головы канала в плане: поверхностные, относительно свободные от наносов струи направлены на нижнее по течению ребро отвода, вызывая интенсивный его размыв, а у верхнего — откладываются крупные наносы. С течением времени голова канала в размываемых грунтах перемещается вниз по течению, что создает затруднения в эксплуатации.

Таким образом, основными и главными достоинствами рассматриваемого класса водозаборов являются простота и дешевизна, из-за чего они получили в свое время широкое распространение, особенно в мелиорации. Недостатки их — в жесткой зависимости режима магистрального канала от уровней воды в реке, малом коэффициенте водозабора и интенсивном захвате донных наносов. Первые два органически присущи бесплотным водозаборам и ограничивают применение последних реками с благоприятной формой гидрографа, вовлечение же наносов может быть уменьшено использованием соответствующих конструктивных мероприятий.

8.1.4. СПОСОБЫ БОРЬБЫ С ВОВЛЕЧЕНИЕМ ДОННЫХ НАНОСОВ

Одним из старых и на первый взгляд очевидным является способ, использующий принцип послойного деления потока. Идея его ясна из рисунка 8.7: поскольку крупные наносы транспортируются в придонных слоях потока, на входе нужно устроить порог I с высотой h_n , большей толщины слоя наносов, чтобы не допустить их в канал. Эффективность такого мероприятия, однако, небольшая, так как циркуляционные скорости (см. 8.1.3) подтягивают наносы к порогу, а транспортирующая способность транзитного потока недостаточна для их удаления. Поэтому с течением времени гряда наносов достигает верха порога, и восходящие токи забрасывают их в канал. Для улучшения смыва наносов перед порогом может быть устроен поллок 2, под которым возникает винтовое движение с повышенной транспортирующей способностью.

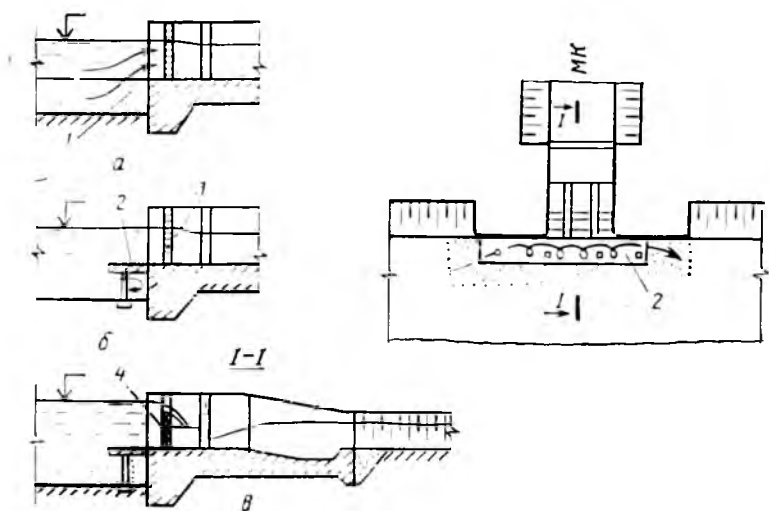


Рис. 8.7. Бесплотинные водозаборы с использованием принципа по-
слойного деления потока для борьбы с наносами:

а — устройство повышенного порога (1); *б* — водозабор с горизонтальным пол-
ном (2); *в* — забор воды с переливом через шандорную стенку (4); 3 — загра-
дительная решетка

При высоких отметках воды в реке реализация принципа по-
слойного деления потока представлена на рисунке 8.7, *в*.
Здесь чистую воду отводят из верхних слоев с переливом через
шандорную стенку 4, устроенную перед рабочим затвором.

Поскольку причина вовлечения в канал большого количе-
ства наносов — неблагоприятная структура скоростей в потоке,
формирующаяся из-за его искривления при отборе части рас-
хода, то эффективным способом уменьшения захвата твердых
частиц является создание поперечной циркуляции противопо-
ложного направления, так, чтобы донные токи отклонялись от
входа в водозабор. Наиболее просто этого достигают, распо-
лагая последний на вогнутом берегу (см. рис. 8.5), куда на-
правлены освещенные поверхностные струи. При необходимости
устройства водозабора на прямолинейном участке русла по-
перечная циркуляция нужного направления может быть вызва-
на установкой в потоке поверхностных плавучих струенаправ-
ляющих систем М. В. Потапова, отклоняющих верхние сло-
и воды к входу в канал. Если же использование поверхностных
направляющих систем по каким-либо причинам невозможно
(в потоке много шуги и мусора, системы мешают судоходству
или миграции рыб и т. д.), сооружают донные пороги противо-

положного направления, отклоняющие придонные слои с наносами от водозабора.

Благоприятным для работы водозабора является уменьшение угла отвода α (см. рис. 8.8): при малых α ось потока перед водозабором искривляется меньше, чем при больших. Для боковых водозаборов, однако, он ограничен $35...30^\circ$; при дальнейшем уменьшении усложняется компоновка узла, возрастают объемы земляных и бетонных работ. Предельного значения угла отвода (0°) достигают в конструкции фронтального водозабора, схема которого приведена на рисунке 8.8, б. В этом случае часть русла отгораживают шпорой δ — каменной дамбой, образуя карман 5, из которого вода попадает в регулятор, а затем в канал. Скорости воды в кармане v_k принимают существенно меньшими, чем в естественном русле v_p , поэтому часть кинетической энергии потока, попадающего из реки в карман, преобразуется в энергию потенциальную, приводя к повышению уровня воды и образованию перепада Δz , тем большего, чем больше соотношение скоростей v_p/v_k . Наличие подпора

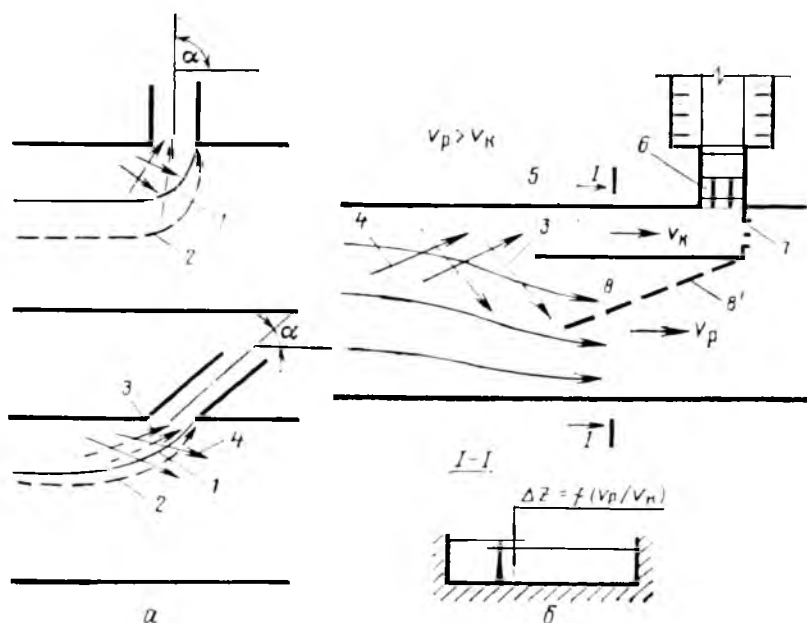


Рис. 8.8. Влияние величины угла отвода на работу водозабора:

а — трансформация зоны отбора при боковом водозаборе с изменением угла отвода; б — схема работы фронтального (шпорного) водозабора; 1 — граница раздела поверхностного потока; 2 — то же, донного; 3, 4 — направление донных и поверхностных токов; 5 — карман; 6 — регулятор водозабора; 7 — промывники; δ , δ' — шпора

вызывает искривление оси потока в реке: вход в карман как бы оказывается «на вогнутом берегу», поэтому захватывающая способность такого водозабора по наносам даже меньше, чем по воде. Особенностью фронтальных бесплотинных водозаборов, называемых также шпорными, является повышенный, по сравнению с боковыми, отбираемый из русла расход Q_v при той же ширине приемной части. Это обусловлено наличием перепада Δz , увеличивающего напор на пороге водоприемника. Такая схема позволяет повысить коэффициент водозабора до 0,5...0,7 при расположении шпоры $8'$ под углом к оси потока.

Малые скорости воды в кармане вызывают осаждение опавших туда наносов, поэтому его нужно периодически очищать механическим способом либо гидравлически — резко открыв промывной регулятор-промывник 7.

8.1.5. ПЛОТИННЫЕ ВОДОЗАБОРЫ

Плотинные водозаборы обычно применяют, если отбираемый расход превышает 0,25...0,35 меженного расхода реки, либо при необходимости обеспечить командование над максимальным расчетным уровнем магистрального канала. Если определяющим оказывается второе условие, возможно использование и других типов водозабора — бесплотинного или с машинной подачей: окончательное решение принимают на основании технико-экономического расчета (рис. 8.9). Здесь определяющим параметром является отметка уровня магистрального канала в створе А. Подача воды возможна с помощью недорогого бесплотинного водозабора, устроенного, однако, на значительном удалении, $l_1 = z_1(i_p - i_k)$, чтобы за счет разницы уклонов реки i_p и канала i_k обеспечить необходимую высоту командования. При устройстве водозабора в створе II необходимо сооружение небольшой водоподъемной плотины либо шпорного водозабора $8'$ (см. рис. 8.8, б), создающего подпор h_2 в русле; длина l_2 холостой части магистрального канала будет меньше, чем в первом случае.

Уменьшить длину холостой части канала можно, приблизив плотинный водозабор к точке А, но это увеличит напор на сооружение. Считают, что строительство плотинных водозаборов экономически оправдано при напорах не более 10 м.

Возможен вариант с машинным водозабором, размещенным в контрольном створе; при этом воду подают непосредственно в рабочую часть магистрального канала.

Очевидно, рациональным будет вариант водозабора с минимальной суммой затрат на его строительство, эксплуатацию и компенсацию наносимого ущерба. Суммируя затраты по каж-

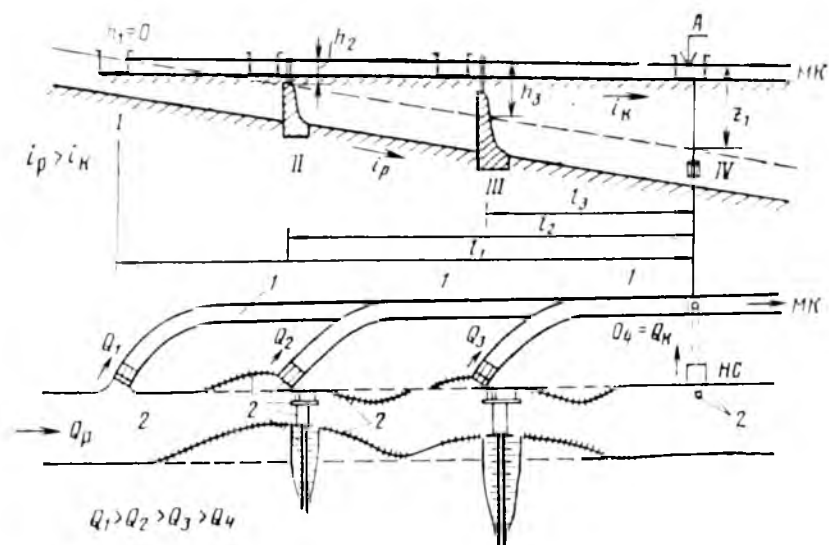


Рис. 8.9. Схема к выбору типа водозабора:

1 — холостая часть магистрального канала; 2 — сооружения водозаборного гидроузла; I — бесплотинный водозабор; II, III — плотинные водозаборы; IV — водозабор с машинной подачей; h_2, h_3 — подпор, создаваемый водозабором; l_1, l_2, l_3 — длина холостой части канала; z_1 — высота подъема машинного водозабора; $Q_1 \dots Q_4$ — забираемые расходы

дому из вариантов, нужно помнить, что расход, забираемый в створах I, II, III, должен быть больше расчетного расхода магистрального канала в створе А на величину фильтрационных потерь по длине холостой его части. Нужно учитывать ущерб, вызванный изъятием из сельскохозяйственного оборота земель, затопленных и подтопленных при подъеме уровня в реке, земель приканальной полосы, необходимость строительства мостов на рассеченных каналами дорогах, а также то, что плотинный водозабор, преграждая естественные пути миграции рыбы, наносит больший ущерб рыбному хозяйству, чем бесплотинный.

8.1.6. СОСТАВ СООРУЖЕНИЙ И КОМПОНОВКА ПЛОТИННОГО ВОДОЗАБОРНОГО ГИДРОУЗЛА

Для обеспечения заданной высоты командования при отборе расходов в соответствии с графиком водопотребления в составе гидроузла (рис. 8.10, а) необходимо иметь водоподпорную плотину 1, головной водозаборный регулятор 4 и сооружение для пропуска транзитного расхода реки — водосливную плотину 2. Для смыва наносов, откладывающихся перед головным

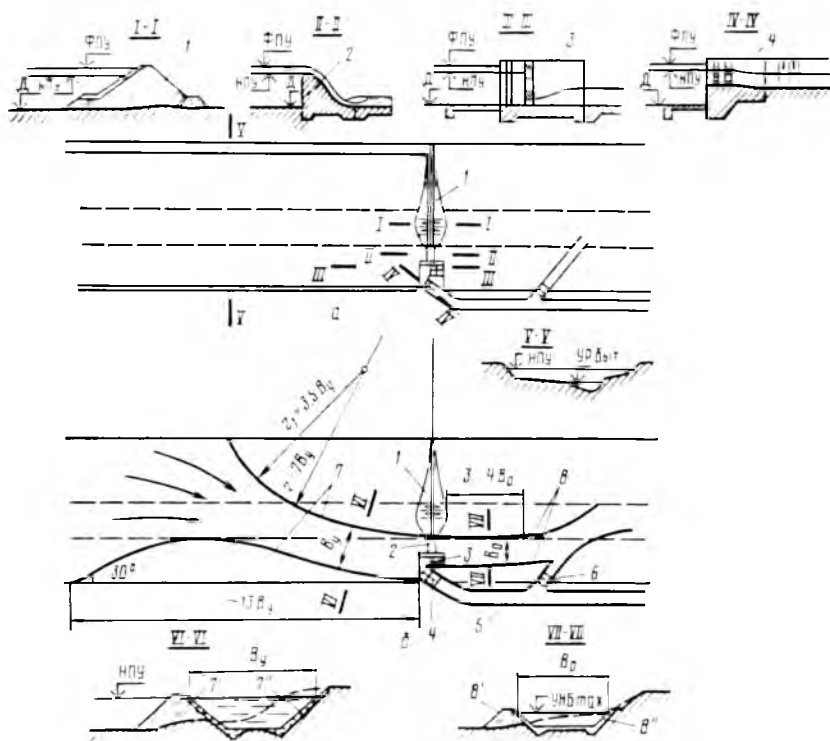


Рис. 8.10. Состав сооружений плотинного водозаборного гидроузла:

1, 2 — глухая грунтовая и водосливная плотины; 3 — щитовая плотина с низким порогом; 4 — водозаборный регулятор; 5 — магистральный канал; 6 — холостой сброс; 7 — регуляционные сооружения подводящего русла; 7' — струенаправляющая дамба; 7'' — срезка берега; 8, 8', 8'' — то же, в НБ

регулятором, рядом с ним обычно устраивают щитовую плотину 3 с пониженным (на отметке дна бытового русла) порогом. Казалось бы, такой гидроузел обеспечивает идеальные условия работы водозабора: созданный подпор уровня снижает скорость воды в реке, ослабляя движение наносов, наиболее крупные из которых оседают, не дойдя до входа в канал. Водозаборный регулятор (IV—IV) имеет достаточно высокий порог, обусловленный разницей глубин в подпертом бьефе и магистральном канале, поэтому воду отбирают из верхних, наиболее чистых слоев потока, а скопившиеся у порога наносы периодически или постоянно (при достаточно больших расходах реки) сбрасывают в НБ через частично открытые отверстия щитовой плотины (III—III). Однако такая ситуация характерна для равнинных рек, несущих малое количество твердых частиц; на предгорных

горных реках она возможна лишь в первое, достаточно короткое время эксплуатации гидроузла. Малая емкость подпора бьефа быстро заносится наносами, начинается образование многочисленных протоков, формирование островов, то есть блуждание русла у водозабора, что может привести к полному выключению последнего из работы.

Для стабилизации водозабора в этом случае на участках ВБ и НБ, примыкающих к гидроузлу, необходимо создать такой режим движения потока, при котором было бы возможно транзитное движение наносов, то есть условия, характерные для устойчивых русл. Один из возможных вариантов обеспечения этих условий показан на рисунке 8.10, б. Напорный фронт всех водопропускных сооружений, включая водозаборный регулятор, влисывают в ширину B_y устойчивого русла, которую определяют по одной из известных зависимостей (см. гл. 7) для паводкового (руслоформирующего) расхода 5...10%-ной обеспеченности. Подводящее русло устраивают криволинейным, применяя струенаправляющие дамбы 7', замыкающиеся на борта поймы. При заборе воды на одну сторону все бетонные сооружения смещают к соответствующему берегу, чтобы избежать устройства начального участка канала в насыпи. Откосы дамб и прорези должны быть тщательно закреплены против размыва транзитным потоком, скорости которого в период паводков могут достигать 2 м/с и более; перед водозабором и щитовой плотиной устраивают бетонное крепление — понур для предотвращения подмыва их потоком, создаваемым при открытии затворов щитовой плотины. Отводящее русло делают прямолинейным шириной B_0 на длине (3...4) B_0 (рис. 8.10, б), что улучшает гидравлический режим НБ.

При необходимости забора воды одновременно на оба берега бетонные сооружения располагают в русле реки, подводящее и отводящее русла в этом случае делают прямолинейными, замыкая струенаправляющие дамбы ВБ на борта поймы и откосы. Для регулирования потока в русле НБ используют регуляторы, которые обычно используют при фронтальном водозаборе.

Дамбы, примыкающие к бортам, позволяют иногда отказаться от грунтовой плотины 1, используя одну из дамб в качестве подпорного сооружения, хотя в этом случае требования к конструкции последней станут более жесткими.

Выполнение работ по регулированию потока ВБ гидроузла приводит к восстановлению транзита наносов через водопропускные сооружения, сопровождающегося поступлением их в магистральный канал, и здесь, как и при бесплотинных водозаборах, возникает проблема борьбы с наносами, во многом определяющая выбор типа и конструктивного решения водозаборного гидроузла.

8.1.7. СПОСОБЫ БОРЬБЫ С НАНОСАМИ, КОНСТРУКТИВНЫЕ СХЕМЫ ПОВЕРХНОСТНЫХ ВОДОЗАБОРОВ

Послойное деление потока используется практически во всех конструкциях таких водозаборов; наиболее простая его реализация в виде повышенного порога водоприемника показана на рисунке 8.10.

Улучшить работу боковых водозаборов позволяет устройство перед водоприемником на уровне порога горизонтального полка 3 (рис. 8.11, а). Пространство под полком сообщается с НБ через нижний ярус промывных отверстий 2, что позволяет периодически (при малых расходах в реке) или непрерывно удалять попадающие туда донные наносы. Полк, разделяя поток на два слоя, дает возможность заметно уменьшить его турбулизацию на входе в водоприемник и снизить захват наносов. Эта достаточно простая конструкция эффективна при расходах реки, позволяющих вести непрерывную промывку наносов; в маловодный период они скапливаются перед водозабором, забрасываются на полк, а затем и в канал.

Другой формой реализации принципа послойного деления потока при боковом водозаборе является устройство промывных наносоперехватывающих галерей 10 в пороге водозабора-водоприемника, как показано на рисунке 8.13. Под действием разницы уровней ВБ и НБ в напорных галереях создаются значительные скорости (5...7 м/с), что приводит к захвату донных наносов. Работа такого водозабора улучшается, если часть галерей вынесена за пределы порога и перехватывает наносы на подступах к водоприемнику.

Принцип послойного деления потока используют и при фронтальных водозаборах, например, в двухъярусном водозаборе с криволинейными лотками (рис. 8.11, б), отводящими воду в магистральный канал. Наносы сбрасывают через промывные отверстия 2 нижнего яруса в напорном или безнапорном режиме. Водоприемные и промывные отверстия снабжены регулирующими затворами. Такие водозаборы устраивают с прямолинейным подводящим руслом, стараясь обеспечить равномерное распределение скоростей по сечению перед водоприемником.

Заметим, что в рассмот-

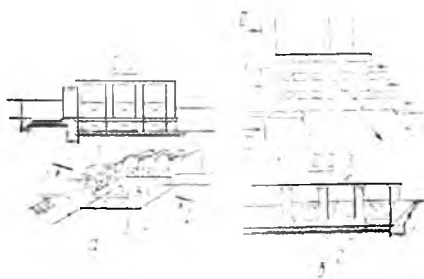


Рис. 8.11. Водозаборы с послойным делением потока:

а — боковой с горизонтальным полком; б — фронтальный двухъярусный; 1 — регулятор; 2 — промывные отверстия плотины; 3 — полк; 4 — водосбросная плотина; 5 — железобетонный лоток; 6 — канал

ренных случаях перед водоприемником формируется поток, структура которого неблагоприятна для работы сооружения: из-за неравномерности распределения расходов по длине и высоте напорного фронта возникают вертикальные, снизу вверх, составляющие скорости, способствующие захвату наносов. Для улучшения эффективности работы сооружения необходимо искать способы активного влияния на структуру водного потока, чтобы вертикальная составляющая скорости перед входом в водоприемник была направлена вниз, а горизонтальные скорости ниже порога — в сторону от него. Проще всего реализовать первое условие, обеспечив более высокие скорости на подходе к промывным устройствам, чем перед водоприемником. Поскольку с увеличением скорости v потока возрастает его кинетическая энергия и уменьшается запас потенциальной энергии, давление P в верхних зонах станет больше давления у дна, и возникает циркуляционное движение с направленной вниз составляющей скорости перед водозабором (рис. 8.12, а). Это возможно, если промывной расход существенно больше забираемого, то есть при малых коэффициентах водозабора.

Возбуждения вертикальной циркуляции нужного направления можно добиться, установив на пути потока вертикальную или слегка наклонную преграду 1 (рис. 8.12, б). Набегая на нее, поток теряет скорость, увеличивая запас потенциальной энергии. Уровень воды у преграды поднимается на величину Δz , вызывая появление вертикального движения вниз, а затем — параллельно дну против направления потока. Там, где скорости этого вторичного движения оказываются близкими к донным скоростям основного потока, возникает «мертвая» зона 2, где и скапливаются наносы. Если водоприемник 4 устроить максимально близко к преграде, а вход в наносоперехватывающие промывные галереи 3 — у «мертвой» зоны, то поступление наносов в канал можно свести к минимуму. Этот принцип успешно реализуется в боковых и фронтальных водозаборах, разработанных профессором Н. Ф. Дanelией.

Конструкция бокового водозабора с наносоперехватывающими галереями показана на рисунке 8.13. Роль преграды, вызывающей в потоке вертикальную циркуляцию, играют затворы 4 промывных отверстий плотины, максимально приближенные к входу в водозабор 1. В результате перед двумя ближними к ним пролетами регулятора 3 образуется зона, свободная от наносов, которые останавливаются несколько выше первого пролета и перехватываются галереями 10. Эффективность такого водозабора по очистке отводимой воды от наносов во много раз выше, чем у простого бокового водозабора, представленного на рисунке 8.10.

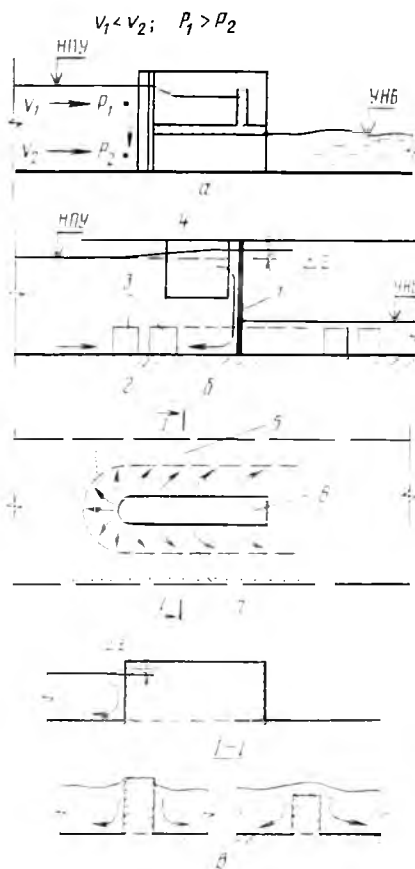
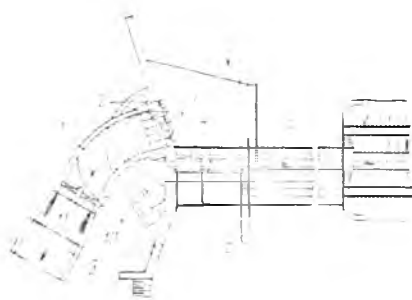


Рис. 8.12. Схема, показывающая возбуждение вертикальной циркуляции при плотинном водозаборе:

a — увеличением скоростей придонных слоев потока; *б* — устройство вертикальной преграды на пути потока; *в* — при обтекании вертикальной преграды; 1 — вертикальная преграда; 2 — зона скопления наносов; 3 — наносоперехватывающие галереи; 4 — водоприемник; 5 — зона концентрации наносов; 6 — бык плотины; 7 — осветленная зона

Рис. 8.13. Боковой водозабор с наносоперехватывающими галереями:

1 — водозабор; 2 — затворы на входе в галереи; 3, 4 — затворы регулятора водозабора и промывных отверстий плотины; 5, 6 — водосбросная и глухая плотины; 7 — дюкер для подачи воды на другой берег; 8 — удлиненный бычок (при фронтальном водозаборе); 9 — магистральный канал; 10 — наносоперехватывающие галереи; 11 — затворы на входе в канал



Еще эффективнее использование принципа вертикальной циркуляции для борьбы с наносами при фронтальном водозаборе. По конструкции он близок к описанному выше, отличаясь от него наличием кармана, образованного удлиненным быком 8 (см. рис. 8.13) и затворами плотины с низким порогом. Фронт водозабора в этом случае является входное сечение кармана, перпендикулярное потоку, поэтому такой водозабор называют фронтальным. Симметричное распределение циркуляционных скоростей по ширине кармана обуславливает полное освобождение значительной его полосы, прилегающей к затворам от наносов, которые перехватываются и сбрасываются в НБ симметрично расположенными галереями (на рис. 8.13 левые галереи не показаны).

Вертикальная циркуляция аналогичного характера возникает и при обтекании потоком вертикальной преграды (см.

рис. 8.12, в). При обтекании, например, быка 6 вдоль его вертикальной поверхности возникает движение со скоростями, направленными вниз, а у порога — от быка. В этом случае зона 7 вблизи быка освобождается от наносов, которые концентрируются в средней части пролета. Устроив водоприемные отверстия в стенках быков, очевидно, можно обеспечить высокое качество забираемой воды. При таком водозаборе может не быть отдельной водосбросной плотины, что позволяет уменьшить длину напорного фронта — условие, важное при строительстве на реках с узкой поймой или без нее. Достоинство бычкового водозабора — удобство сброса шуги, которая циркуляционными токами отжимается от отверстий водоприемника к центру пролетов, не вызывая существенных затруднений в работе сооружения. Однако все эти соображения справедливы при малых соотношениях отбираемого расхода и расхода реки, когда быки интенсивно обтекаются транзитным потоком, поэтому такие водозаборы находят применение на достаточно полноводных реках.

Эффективное средство борьбы с вовлечением донных наносов — создание в потоке на подходе к водоприемнику мощной поперечной циркуляции нужного направления. Наиболее распространенным водозабором такого типа является Ферганский (рис. 8.14). Циркуляция здесь возникает за счет придания искусственному подводящему руслу 1 криволинейной формы либо при расположении водозабора на закрепленном криволинейном вогнутом участке реки. В этом случае поверхностные струи направлены фронтально к регулятору-водоприемнику, а донные — отклоняются и сбрасываются через частично открытые отвер-

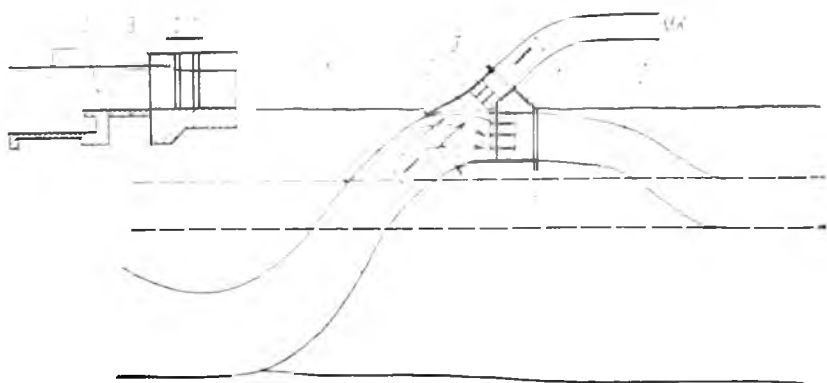


Рис. 8.14. Схема водозабора с использованием поперечной циркуляции потока (ферганского типа):

1 — зарегулированное русло; 2 — криволинейный порог с подком; 3 — регулятор водозабора; 4 — промывное отверстие плотины; 5 — водосбросная плотина

ствия водосбросной плотины 5 с низким порогом. При малых расходах воды в реке, когда интенсивность циркуляции недостаточна, донные наносы отклоняются криволинейным порогом 2 с горизонтальным полком к ближайшему промывному отверстию 4 плотины и сбрасываются в НБ.

Создание искусственной поперечной циркуляции перед плотинными водозаборами возможно и другими средствами, например применением поверхностных струенаправляющих систем.

8.1.8. ГЛУБИННЫЕ РШЕТЧАТЫЕ ВОДОЗАБОРЫ

Воду в таких водозаборах отбирают заглубленными под уровень отверстиями, перекрытыми решетками для защиты от попадания крупных наносов и плавающих тел. Наибольшее распространение они получили на горных реках, поэтому часто такие водозаборы называют горными.

Характерные особенности горных рек: быстрое наступление паводков с расходами, многократно превышающими меженные; высокие скорости, обеспечивающие перемещение большого количества очень крупных фракций наносов, даже валунов; возможность прохождения грязе-каменных (селевых) потоков и большое количество шуги в осенне-зимний период при отсутствии стабильного ледяного покрова. С учетом этого, устраивая водозабор, стараются обеспечить минимальное сжатие живого сечения русла как по ширине, так и по глубине потока и по возможности избегать водосбросных отверстий с затворами. Этим условиям в наибольшей мере отвечают конструкции, в которых водоприемные отверстия совмещены с водосбросными и выполнены в виде траншей в их пороге, перекрытых решетками. Простейшая схема такого водозабора показана на рисунке 8.15, а и представляет собой бетонную траншею, проложенную

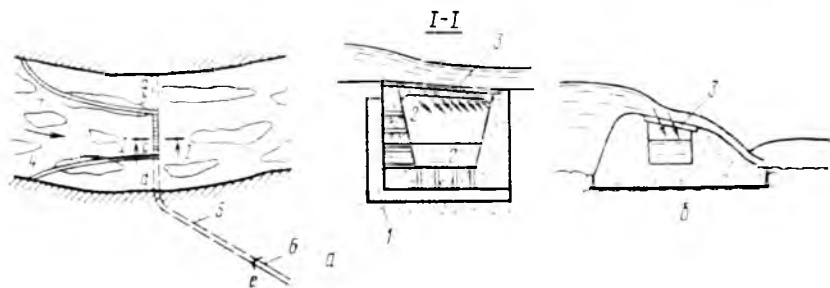


Рис. 8.15. Горный водозабор с донной решеткой:

а — бесплотинный; б — плотинный; 1 — фильтр; 2 — отверстия; 3 — донная решетка; 4 — направляющие дамбы; 5 — труба; 6 — канал

в отложениях реки. Вода, проходящая над решеткой 3, частично проваливается в траншею, крупные же наносы проходят над ней в НБ. Поскольку отобранная вода содержит значительное количество песка и гравия, дно траншеи и отводящую трубу 5 выполняют с уклоном, обеспечивающим скорость потока, достаточную для их транспортировки до очистных сооружений. На реках с широкой поймой устраивают направляющие дамбы 4, обеспечивая устойчивость русла во избежание завала наносами водоприемника. Для забора подрусловых вод на частично пересыхающих реках в передней стенке и дне траншеи могут быть выполнены отверстия 2, защищенные фильтром 1.

При необходимости увеличения высоты командования траншею устраивают в теле бетонной водосливной плотины по всей длине или на ее части, в зависимости от забираемого расхода (рис. 8.15, б).

8.1.9. ФИЛЬТРАЦИОННЫЕ (ИНФИЛЬТРАЦИОННЫЕ) ВОДОЗАБОРЫ

Эти водозаборы отбирают воду из поверхностных водоисточников, иницируя фильтрационный поток из них в направлении водоприемника. Их применяют на реках с очень тяжелыми шуго-ледовыми условиями, в том числе и полностью промерзающих, на реках с большим количеством наносов, когда забираемый расход составляет незначительную часть расхода реки, при заборе воды из озер и морей. Некоторые схемы фильтрационных водозаборов представлены на рисунке 8.16. В скважинном водозаборе (рис. 8.16, а) водоприемником является оборудованная специальными фильтрами скважина 1, вода из которой отбирается насосной станцией 2. Такие водозаборы целесообразны, если берег реки сложен сильно проницаемыми грунтами, а поток несет большое количество мелких наносов. Водозаборы, представленные на рисунке 8.16, б, применяют на полностью пересыхающих или промерзающих реках. Водоприемник 4 в этом случае устраивают в виде траншеи, пересекающей русло и заполненной фильтрующим материалом 6. Внутри траншеи может быть уложена перфорированная труба 5, деревянный или железобетонный короб 7. В скальных руслах вода к насосной станции 2 может отводиться непосредственно по траншее, заполненной сортированным камнем 9. Иногда подрусловые водозаборы выполняют комбинированными: при наличии поверхностного потока они работают, как траншейные, забирая одновременно и подрусловую воду, а при пересыхании — как фильтрующие (см. рис. 8.15, а).

Схему в (см. рис. 8.16) применяют на маловодных реках. Водоприемник в виде перфорированной трубы, обсыпанной

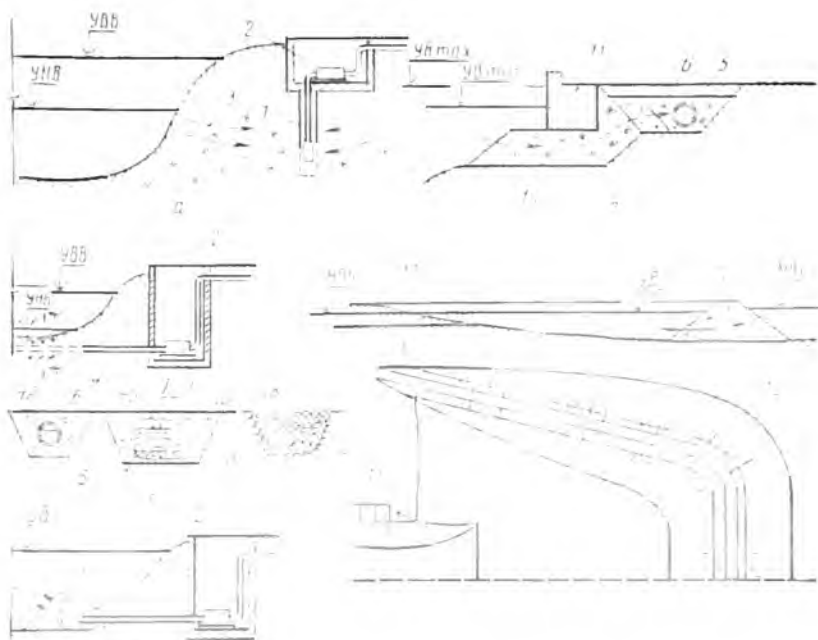


Рис. 8.16. Схемы фильтрационных водозаборов:

а — скважинный; *б* — подруслый; *в, г* — с горизонтальным коллектором; *д* — с фильтрующими дамбами; *1* — скважина, оснащенная фильтром; *2* — насосная станция; *3* — направление фильтрационного потока; *4* — подруслый водоприемник; *4А, 4Б, 4В* — варианты его исполнения; — перфорированная труба; *6* — фильтр; *7* — короб из пластин или брусьев; — обкладка мхом; *9* — сортированный камень; *10* — каменная постель; *11* — массив набережной; *12* — фильтрующая дамба; *13* — отводящий канал

фильтрующим материалом, может иметь большую длину, обеспечивая сбор и предварительную очистку воды даже при малых расходах. Эти схемы чаще всего используют для хозяйственных питьевых водозаборов малой производительности.

Схема *г* (см. рис. 8.16) может быть рациональной при заборе воды из озер и водохранилищ, а иногда — и при морских водозаборах. Водоприемник здесь выполнен в виде перфорированного железобетонного коллектора за ограждающим берегозащитным сооружением *11* — набережной. Забираемая из водоема вода, фильтруясь сквозь каменную наброску постели *10* основания ограждающего массива, проходит первичную очистку, не засоряя фильтров *6*.

Водозаборы с фильтрующими дамбами *12* (см. рис. 8.16, *д*) могут обеспечивать подачу достаточно больших расходов в канал *13*. Воду отбирают из огражденной дамбами акватории:

малые скорости в ней предотвращают появление шуги, а вода, фильтруясь через дамбы, освобождается от крупных и средних наносов. Такие водозаборы применяют на морях, озерах и крупных водохранилищах.

8.2. ОТСТОЙНИКИ

8.2.1. НАЗНАЧЕНИЕ И КЛАССИФИКАЦИЯ ОТСТОЙНИКОВ

Как правило, вода, отводимая речными водозаборами, содержит большое количество твердых частиц — наносов. Попадая из бурного речного потока в канал с меньшей турбулентностью, твердые фракции под действием силы тяжести оседают, уменьшая его пропускную способность. Удаление наносов из каналов требует привлечения дополнительных сил и средств, а необходимость их складирования приводит к изъятию земель из сельскохозяйственного оборота.

Речная вода перед подачей потребителю должна быть в достаточной степени очищена от наносов: для использования на гидроэнергетических объектах из нее удаляют крупные фракции (0,2...0,5 мм и более). Обычно такую очистку осуществляют в голове магистрального канала, сбрасывая задержанные наносы в НБ гидроузла. Вода с более мелкими фракциями попадает в канал или закрытый водовод с относительно высокой скоростью и, пройдя через турбины, выходит в русло ниже плотины. На всех участках этого тракта транспортирующая способность потока такова, что частицы наносов, оставшиеся после первичной очистки, нигде не осаждаются.

Напомним, что транспортирующей способностью называют предельное весовое количество частиц в единице объема, которое поток может переносить во взвешенном состоянии. Эта величина тем больше, чем выше удельная кинетическая энергия потока, и падает с увеличением крупности наносов.

Если мутность потока оказывается больше его транспортирующей способности, то часть наносов осаждается, в противном случае поток будет размывать русло, насыщаясь наносами до достижения мутности, соответствующей его транспортирующей способности.

В мелиоративных системах скорость и транспортирующая способность потока меняются по мере перехода к каналам младших порядков, оказываясь весьма малой непосредственно в поливной сети. Если при очистке воды ориентироваться на транспортирующую способность, например, магистрального канала, то каналы младших порядков заиливаются, а часть пес-

чанных наносов, ухудшающих плодородие почвы, выносятся на поля. И наоборот — при освещении до транспортирующей способности оросителей поток размывает ложе каналов старших порядков. Очевидно, в таких условиях необходимо очищать оросительную воду в несколько ступеней, уменьшая ее мутность по мере падения скоростей в каналах и оставляя на последней ступени только те фракции наносов, которые способствуют улучшению структуры почв или являются удобрением (мелкие илстые и коллоидные частицы).

Таким образом, разница между *энергетическими* и *ирригационными* отстойниками состоит в том, что первые предназначены для осаждения лишь крупных фракций наносов, тогда как роль ирригационных — обеспечить, кроме этого, еще и заданную мутность воды на выходе в канал.

Ирригационные отстойники, в свою очередь, подразделяют на *головные*, расположенные в начальной части магистрального канала и предназначенные в первую очередь для очистки воды от фракций крупнее 0,1 мм, и *внутрисистемные*, устраиваемые в местах снижения транспортирующей способности потока для приведения мутности воды в соответствие с этим показателем. Конструктивно отстойник — это участок канала с пониженной скоростью движения потока малой турбулентности, в котором вертикальные составляющие скорости значительно меньше гидравлической крупности частиц, подлежащих осаждению. Поскольку скорость осаждения крупных частиц больше, чем мелких, длина энергетических отстойников оказывается меньше, чем головных ирригационных; длина внутрисистемных отстойников может достигать нескольких сотен метров.

В коротких отстойниках осевшие наносы, как правило, удаляют, создавая высокоскоростной поток, захватывающий и уносящий отложения в реку, или естественное понижение местности. Такие отстойники называют отстойниками с *гидравлической промывкой*. Ирригационные отстойники выполняют обычно с *механической очисткой*, применяя гидромеханизацию или сухоройные механизмы.

При любом способе удаления наносов в период очистки поток, поступающий в канал, будет иметь повышенную мутность. Если это недопустимо, то параллельно друг другу устраивают два или несколько отстойников: при очистке одного включают в работу другой. По этому признаку отстойники разделяют на *однокамерные* и *многокамерные*.

Наносы из отстойников с гидравлической промывкой удаляют периодически, по мере накопления в камере, либо непрерывно в процессе их осаждения. Соответственно такие отстойники разделяют на отстойники с *периодической* и *непрерывной промывкой*.

8.2.2. ПРИНЦИП УСТРОЙСТВА И СХЕМА РАБОТЫ ОТСТОЙНИКА ПЕРИОДИЧЕСКОГО ДЕЙСТВИЯ С ГИДРАВЛИЧЕСКОЙ ПРОМЫВКОЙ

Для простоты изложения рассмотрим этот вопрос на примере энергетического отстойника, критерием эффективности работы которого является осаждение фракций наносов крупнее расчетной, например крупнее 0,2 мм. Предположим также, что наносы, как крупные, так и мелкие, равномерно распределены по глубине потока, поступающего в камеру отстойника.

Твердые частицы с расчетным диаметром, расположенные в начальном сечении камеры, будут опускаться в потоке жидкости со скоростью, соответствующей их гидравлической крупности ω_p , одновременно перемещаясь по горизонтали со скоростью потока v (рис. 8.17). Так как оба эти движения равномерные, то траектория частицы представляет собой наклонную прямую линию. При известной глубине потока h расстояние l_p , на которое переместится частица 1, расположенная в верхней точке начального сечения при падении ее на дно, можно найти из подобия треугольников Oab и OAB : $l_p = hv/\omega_p$. Длина отлета всех прочих частиц расчетного диаметра, расположенных ниже, будет меньше l_p . Очевидно, и все более крупные фракции наносов опустятся на дно, не достигнув точки B .

Рассмотренная схема дает возможность обоснованно назначить длину камеры отстойника, которая, очевидно, должна быть несколько больше l_p . По мере осаждения наносов уменьшается глубина и возрастает скорость потока в камере, и при длине l_p расчетная фракция будет выноситься за пределы отстойника вскоре после начала его работы. Отстойники с горизонтальным дном неудобны в эксплуатации: при промывке камеры в ней трудно создать большие скорости, необходимые для взмучивания и удаления наносов, поэтому дну придают положительный или отрицательный уклон (0,5...2%). Если средняя глубина h_{cp} такой камеры равна глубине h камеры постоянного сечения, то длина l_p не изменится, хотя траектория движения частиц станет криволинейной из-за изменения горизонтальной скорости по длине отстойника (рис. 8.17, б, в). С учетом сказанного, длину камеры (м) принимают по формуле

$$L_k = \alpha l_p = \alpha H_k v_{cp} / \omega_p,$$

где H_k и v_{cp} — глубина (м) и скорость (м/с) в среднем сечении камеры, $H_k = h_{cp}$; α — коэффициент, учитывающий увеличение средней скорости и снижение глубины при аккумуляции наносов в отстойнике, а также всегда имеющуюся вертикальную составляющую скорости потока, $\alpha = 1,2 \dots 1,5$.

Среднюю глубину воды в отстойнике принимают 4...5 м, а скорость 0,2...0,4 м/с, что позволяет осажждать фракции крупнее

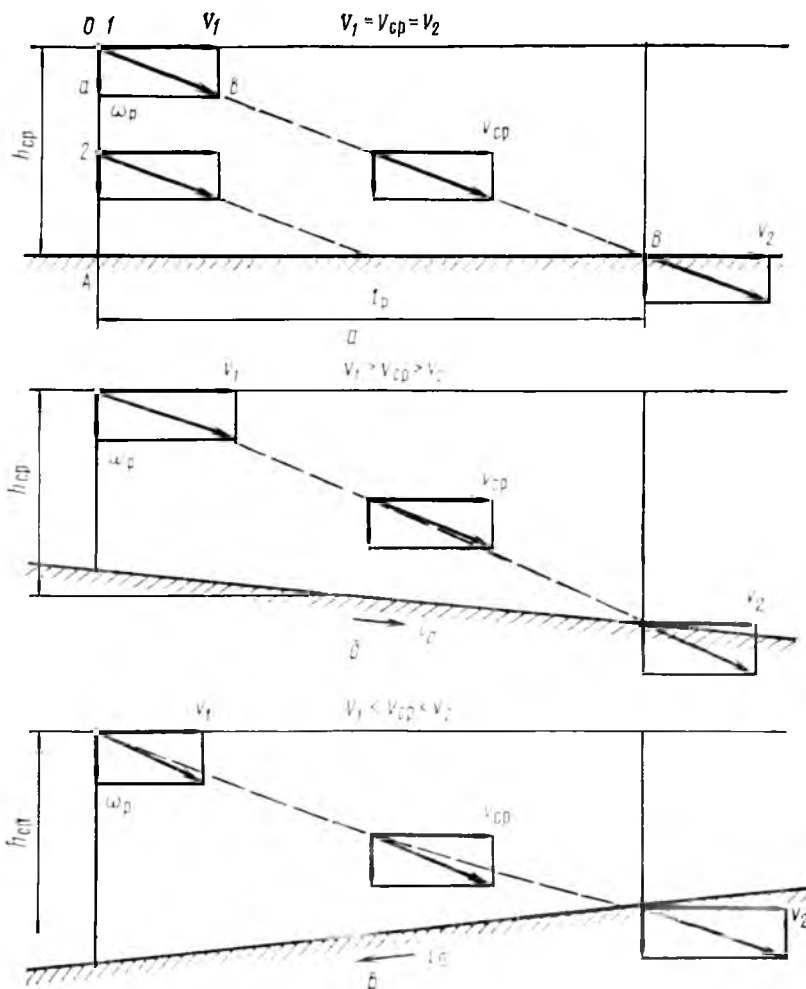


Рис. 8.17. Схема к определению длины отлета частицы расчетной крупности: a — в отстойнике с горизонтальным дном; $б, в$ — в отстойнике с положительным и отрицательным уклонами дна; 1 — частица у поверхности потока; 2 — частица на удалении от поверхности

0,2 мм при относительно небольшой (100...120 м) длине камеры. Ширину камеры назначают не более $1/3$ ее длины, в противном случае трудно обеспечить равномерность распределения скоростей по сечению потока. С этой же целью за входным порогом устраивают решетки 2 для выравнивания скоростей (рис. 8.18). Камеры многокамерных отстойников обычно вы-

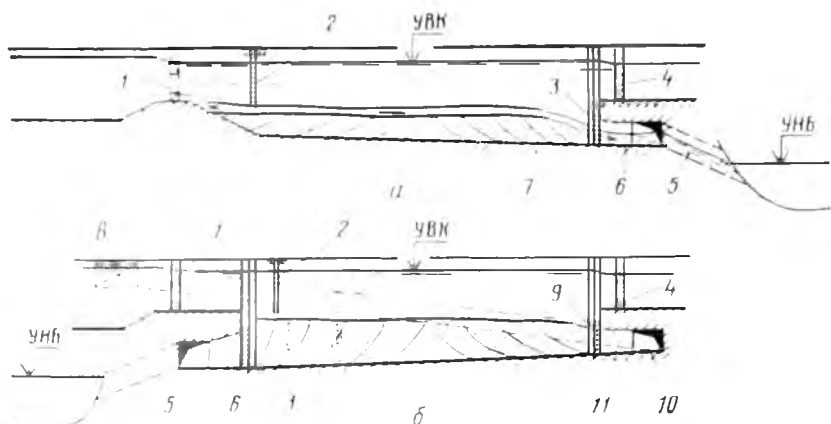


Рис. 8.18. Схемы отстойников с гидравлической промывкой периодического действия:

1, 4 — затворы входного и выходного порогов; 2 — выравнивающие решетки; 3 — затворы промывных галерей; 5 — промывной коллектор; 6, 11 — промывные и выпускные галереи; 7 — отложения наносов; 8 — затворы напорного водовода; 9 — затворы выпускных галерей; 10 — напорный водовод

полняют прямоугольного сечения из армированного бетона или железобетона.

Порядок работы отстойников периодического действия с прямым и обратным уклонами камеры показан на рисунке 8.18.

Процесс осветления воды проходит при открытых затворах 1, 4 входного и выходного порогов, все другие затворы — закрыты. В процессе работы более крупные наносы откладываются в начальной части камеры, мелкие фракции относительно равномерно распределяются по длине отстойника. По мере накопления наносов скорости потока возрастают, и частицы с расчетной крупностью начинают вылетать за пределы камеры, попадая в канал, что указывает на необходимость ее промывки.

Отстойник с прямым уклоном (см. рис. 8.18, а) промывают следующим образом. Закрыв затворы входного и выходного порогов, открывают затворы 3 промывных галерей, куда устремляется вода, наполняющая камеру, размывая и унося наносы, отложившиеся вблизи входа в галереи 6. Дальнейшую промывку проводят при частично открытом затворе 1. Струя, выходящая из-под затвора, с высокой скоростью движется по слою отложений, взмучивая и захватывая их. Поток на входе галереи имеет высокую концентрацию наносов, поэтому промывной коллектор 5 должен иметь уклон, обеспечивающий соответствующую транспортирующую способность. Наибольшую сложность представляет удаление крупных фракций, отложившихся

в передней части камеры, особенно в конце промывки. Чтобы создать высокую скорость потока, необходимую для их удаления, дну камеры придают значительный уклон, уменьшая аккумулялирующую емкость отстойника.

Последнего недостатка лишены *отстойники с обратным уклоном* дна (см. рис. 8.18, б). Здесь промывные галереи 6 устраивают в теле входного порога, соединяя их коллектором 5 с НБ водозаборного гидроузла. Промывку проводят, пуская воду из концевой части камеры, чистую — из магистрального канала, либо из выпускных галерей 11, соединенных с ВБ напорным водоводом 10.

В первом случае процесс промывки не отличается от описанного выше, только вода подается из-под затвора 4 при закрытом затворе 1 на входном пороге. Эта схема предполагает значительное уменьшение подачи в период промывки камер либо устройство резервной камеры. Последнее резко увеличивает стоимость отстойника.

Более экономичен забор промывной воды из ВБ, несмотря на необходимость устройства водовода 10 и выпускных галерей 6. Очистку камеры ведут при закрытых затворах 1, 2 на входном и выходном порогах, открывая затворы 3, 9 промывных и выпускных галерей и затвор 8 напорного водовода.

Недостаток всех описанных выше отстойников — уменьшение подачи при промывке камер. От этого недостатка свободны отстойники с непрерывной промывкой.

8.2.3. ПРИНЦИП УСТРОЙСТВА И СХЕМА РАБОТЫ ОТСТОЙНИКА НЕПРЕРЫВНОГО ДЕЙСТВИЯ

Схема наиболее распространенного отстойника с непрерывной промывкой показана на рисунке 8.19. Стенки камеры выполнены с переменным уклоном: вертикальные в верхней части и наклонные под углом около 45° в нижней. По оси камеры устроена промывная галерея 8, перекрытая сверху решеткой 3, выходящая в промывной коллектор 6 и сообщающаяся через него с НБ. Высота галереи увеличивается по мере удаления от начала камеры, позволяя обеспечивать в ней заданную скорость при постоянно возрастающем расходе, поступающем через отверстия решетки.

Наносы, вносимые водой в камеру, опускаются под действием силы тяжести, а также под воздействием вертикальной составляющей скорости, обусловленной движением воды из камеры в галерею с удельным расходом $q_{\text{пр}}$. Попадая на наклонные стенки, они скатываются к решетке и через ее отверстия — в галерею, где увлекаются потоком со скоростью 3...5 м/с в

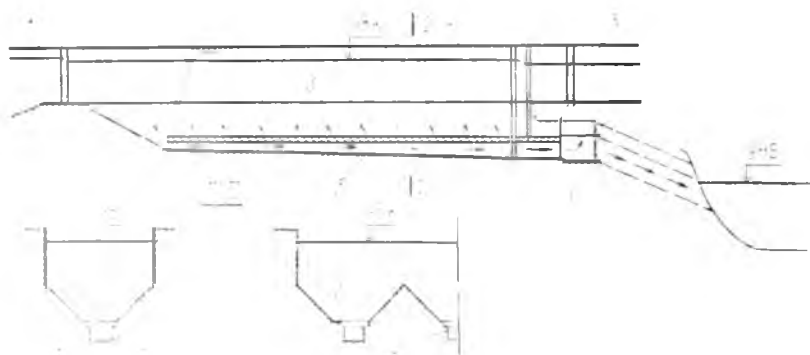


Рис. 8.19. Схема отстойника непрерывного действия с донными промывными галереями:

а — односекционная; *б* — многосекционная камера; 1, 5 — затворы входного и выходного порогов; 2 — выравнивающие решетки; 3 — решетка промывной галереи; 4 — верхний затвор промывного тракта; 6 — промывной коллектор; 7 — затвор промывной галереи; 8 — промывная галерея

промывной коллектор и далее — в реку или естественное понижение местности.

Глубину воды в камере принимают постоянной и равной 3... 5 м; ширина зависит от числа секций, включающих галерею и примыкающие к ней наклонные плоскости (см. рис. 8.19, *а, б*). Обычно ширину камеры ограничивают значением $B_k = 1/3 L_k$ из условия обеспечения равномерности скоростей потока, принимаемых 0,3... 0,5 м/с.

Длина, на которой частица расчетной фракции, расположенная у поверхности, опустится на дно камеры, может быть найдена из тех же условий, что и в отстойнике с периодической промывкой; частица равномерно перемещается по горизонтали со средней скоростью v_{cp} , одновременно опускаясь с постоянной скоростью ω_p . Здесь, кроме того, к ней добавляется скорость промывного потока в галерею v_v , и суммарная скорость осаждения частицы будет $(\omega_p + v_v)$. Как и ранее, из подобия треугольников *AOB* и *Oab* (см. рис. 8.17, *а*) получим $h_{cp}/l_p = (\omega_p + v_v)/v_{cp}$, откуда легко найти l_p . Поскольку в отстойнике этого типа аккумуляции наносов не происходит, длину камеры L_k принимают равной l_p , имея в виду, что $v_v = q_{пр}/B_k = Q_{пр}/L_k B_k$, получим $L_k = H_k v_{cp}/\omega_p = -Q_{пр}/B_k \omega_p$.

Длина камеры отстойника непрерывного действия существенно меньше, чем периодического. Такой отстойник не требует устройства резервных камер, работа его достаточно легко может быть автоматизирована.

Однако при всех своих преимуществах отстойники описываемого типа не получили широкого распространения по ряду

причин, первой из которых являются большие потери воды на промывку. Хотя промывной расход почти в 10 раз меньше, чем у периодического отстойника, он идет постоянно, тогда как у последнего время промывки обычно не более $\frac{1}{20}$ времени работы камеры даже в период интенсивного движения наносов, а в межень его промывают раз (30...40 мин) в несколько суток. Отстойник непрерывного действия более сложен по конструкции. Это в известной мере уравнивает затраты на его строительство в сравнении с периодическим, имеющим более длинную камеру.

Уменьшение потерь промывной воды возможно, если в межень, когда в потоке относительно мало наносов, использовать отстойник в периодическом режиме. Для этого в низовом пороге (см. рис. 8.19) устраивают дополнительное отверстие, перекрываемое затвором 4 и сообщающее камеру с коллектором 6, а галерею 8 снабжают затвором 7, позволяющим выключить ее из работы. Таким образом, в многоводный период отстойник сбрасывает наносы непрерывно при открытых затворах 1, 2, 7 и закрытом 4, а в межень — периодически, как было описано ранее, при отключенной галерее 8. Затворы 4 и 7 применяют и для очистки решетки от налипшего мусора в режиме непрерывной промывки: резко закрывают затвор галереи, создавая в ней повышенное давление, а всплывший мусор смывают в коллектор, подняв на короткое время затвор 4.

Имеются и другие конструкции отстойников непрерывного действия.

8.2.4. ОТСТОЙНИКИ МЕЛИОРАТИВНЫХ СИСТЕМ (ИРРИГАЦИОННЫЕ)

Обычно в таких отстойниках осадению подлежат частицы крупнее 0,05 мм. При средней глубине воды 2...4 м и скорости потока 0,15...0,25 м/с (при меньших вода интенсивно прогревается солнцем, что ведет к бурному развитию водной растительности) длина отстойника может достигать 3...4 км, поэтому гидравлические способы удаления осажденных наносов, описанные выше, здесь не применимы: очистку проводят с использованием сухоройных механизмов либо гидромеханизацией.

Отсутствие значительных скоростей потока позволяет выполнять ирригационные отстойники в виде уширенных участков канала даже в земляном русле с бетонными входным и выходным порогами (иногда только выходным, как в упоминавшемся прокопе-отстойнике).

При постоянной скорости в камере мутность потока на выходе из такого простейшего отстойника будет изменяться во

времени, достигая максимума к моменту расчетного его заиления. Поддерживать постоянное значение этого параметра можно, регулируя скорость воды в камере. При этом расход отстойника будет больше расчетного, поэтому за отстойником должен быть устроен холостой сброс, обеспечивающий подачу в соответствии с графиком водопотребления; соответственно больше расчетного должен быть и расход, забираемый из водоисточника. Регулировать мутность на выходе можно и иначе — подавая часть расхода

в обход отстойника из подводящего канала и смешивая его с переосветленным потоком непосредственно в отводящем канале. Этот способ не требует забора лишней воды, но допускает поступление в систему части расхода без предварительной очистки, что возможно, если содержание в ней крупных фракций незначительно.

Более совершенны ирригационные отстойники с гидравлической очисткой, в которых непрерывность удаления наносов обеспечивает постоянство режима и подачу в канал воды строго расчетной мутности. Камера такого отстойника треугольной формы обеспечивает сползание осаждающихся наносов на дно. Удаляют их с помощью сифона. Сифон установлен на мосту, перемещающемся по рельсам вдоль камеры. Он непрерывно отсасывает осевшие наносы и сбрасывает их в виде пульпы в отводящий лоток. Ширина камеры такого отстойника невелика, поэтому его применяют при небольших (до 3 м³/с) расходах.

Озерные отстойники — естественные понижения местности, приспособленные для осаждения наносов. Схема озерного отстойника приведена на рисунке 8.20. Чашу будущего отстойника планируют и ограждают дамбами, чтобы избежать затопления больших площадей и образования мелководий, ухудшающих санитарные условия вблизи сооружения («цветение» воды, размножение комаров и т. д.). Поскольку отстойник рассчитан на многолетний срок работы, чашу расчлениают дамбами или стенками 8 на ряд узких секций, включая их в работу последовательно, по мере заиления, с помощью каналов-прокопов 3. Резервные секции 6 заполняют водой и используют как пруды для разведения рыбы или водоплавающей птицы.

Мутность на выходе секции 5 регулируют смешиванием осветленной воды с неосветленной, подаваемой обводным каналом 2, меняя ее расход с помощью регуляторов 4. Подачу воды в сек-

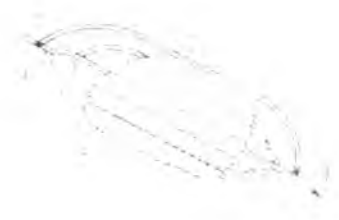


Рис. 8.20. Схема озерного отстойника:

1, 2 — подводящий и обводной каналы; 3 — каналы-прокопы; 4 — регулятор; 5 — секция, работающая на осаждение наносов; 6, 7 — резервные и заиляющиеся секции, 8 — стенки секционирования

цию ведут до полного ее заилиenia, а затем переключают на следующую. После полного заилиenia емкости отстойника вся его площадь может быть использована в полезных целях.

Такой отстойник экономичен из-за его малой строительной стоимости и исключения затрат на удаление наносов. Обычно озерные отстойники применяют в качестве внутрисистемных, на второй ступени осветления воды, но возможно их использование и как головных.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Каковы основные требования, предъявляемые к водозаборам?
2. Какие типы водозаборов применяют для отбора воды из водохранилищ?
3. Каковы достоинства и недостатки бесплотинных водозаборов? На каких реках удобно устраивать такие водозаборы в мелиоративных целях?
4. Какие Вы знаете способы борьбы с вовлечением донных наносов в бесплотинные водозаборы?
5. Перечислите основные сооружения плотинного водозаборного гидроузла. Каково назначение каждого из них?
6. Как реализуется принцип послойного деления потока для борьбы с захватом наносов в боковых и фронтальных плотинных водозаборах?
7. Как использовать явления поперечной циркуляции и вертикальной циркуляции потока при набегании на преграду для борьбы с наносами?
8. Как учитываются особенности горных рек при устройстве на них водозаборов?
9. В каких случаях целесообразно применение фильтрационных водозаборов?
10. В чем состоит принципиальное отличие ирригационных отстойников от энергетических?
11. Почему нельзя назначить длину камеры отстойника с периодической очисткой, равную длине отлета частицы расчетной фракции?
12. Каковы достоинства и недостатки отстойников с непрерывной промывкой по сравнению с отстойниками периодического действия?

Глава 9. НАСОСНЫЕ СТАНЦИИ И ГИДРОТЕХНИЧЕСКИЕ УЗЛЫ МАШИННОГО ВОДОПОДЪЕМА

9.1. НАЗНАЧЕНИЕ И КЛАССИФИКАЦИЯ. СОСТАВ УЗЛА С МАШИНЫМ ПОДЪЕМОМ ВОДЫ

Насосные станции, являясь специальными гидротехническими сооружениями, предназначенными для подачи воды на отметку, превышающую уровень водисточника, нашли широкое применение во всех отраслях водного хозяйства. Без их использования немислимы системы водоснабжения и канализации, современные оросительные и осушительные системы.

В гидроэнергетике насосные станции — необходимая часть комплекса гидроаккумулирующих электростанций (ГАЭС).

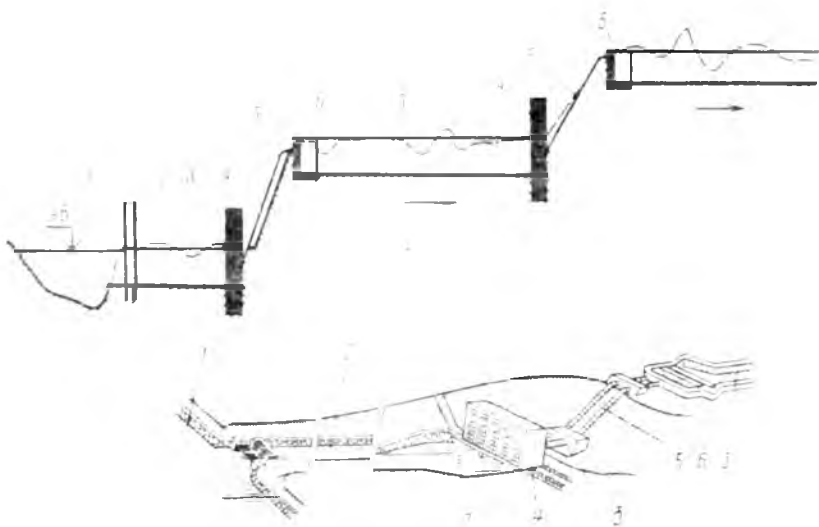


Рис. 9.1. Схема канала для территориального перераспределения стока (а) и гидроузла с машинной подачей (б):

1 — водоисточник; 2 — водозабор; 3, 3' — подводящий и магистральный каналы; 4, 4' — насосные станции первой и последующей ступеней подъема; 5 — напорный трубопровод; 6 — напорный бассейн; 7 — аванкамера

По *расходам (подаче) воды*, подаваемой насосными станциями, их подразделяют на особо крупные (подача более $100 \text{ м}^3/\text{с}$), крупные ($10 \dots 100 \text{ м}^3/\text{с}$), средние ($1 \dots 10 \text{ м}^3/\text{с}$) и малые (до $1 \text{ м}^3/\text{с}$). Особо крупные и крупные обычно сооружают на каналах для территориального перераспределения стока и на больших мелиоративных каналах (рис. 9.1, а), средние и малые получили широкое распространение в оросительных системах и системах водоснабжения.

По *месту расположения в гидросистеме* насосные станции делят на головные или первого подъема 4, подающие воду непосредственно из водоисточника 1 (см. рис. 9.1), и станции второго, третьего и т. д. подъема (поз. 4'). Станции, предназначенные для подачи из подземных источников, называют артезианскими. При расположении на напорной сети станция может быть головной и подкачивающей, то есть повышающей напор в следующей за ней части трубопровода.

Насосные станции могут быть *постоянными и временными*. Первые обеспечивают подачу в крупные каналы, системы водоснабжения; вторые обычно служат для орошения. Постоянные насосные станции являются, как правило, стационарными, временные выполняют и стационарными упрощенной конструкции,

и передвижными, обычно на базе автоприцепов или плавучими.

Комплекс гидротехнических сооружений и устройств, обеспечивающий забор воды из водоемисточника, подъем на заданную высоту и подачу под необходимым напором потребителю,— *гидротехнический узел машинного водоподъема*.

Схема крупного узла с машинной подачей приведена на рисунке 9.1, б. Воду из реки 1 (или крупного канала) отбирают с помощью открытого бокового водозабора 2 (см. гл. 8.1), снабженного сороудерживающими решетками, шуго- и рыбозащитными устройствами. Канал 3 транспортирует воду до водоприемника — аванкамеры 7 насосной станции 4, откуда ее напорными трубопроводами 5 подают в напорный бассейн 6 и магистральный канал 3'. Если предусматривают подачу на более высокие отметки, в конце канала устраивают насосную станцию второго подъема. Основным сооружением, определяющим параметры узла машинного водоподъема и, в конечном итоге, его стоимость и экономическую эффективность, является *насосная станция*, включающая насосные установки и элементы управления агрегатами последних, смонтированные в здании станции. В свою очередь, насосная установка состоит из насосного агрегата и комплектующего оборудования: водозаборные устройства, всасывающие трубы, напорные трубопроводы и водовыпускные устройства. *Насосный агрегат* состоит из насоса и приводящего двигателя (обычно электрического, реже — внутреннего сгорания). *Насосом* называют гидравлическую машину для преобразования подводимой извне механической энергии в избыточную энергию жидкости.

9.2. КЛАССИФИКАЦИЯ И ОСНОВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ НАСОСОВ

Насосы делят на две основные категории — динамические и объемные. В *динамических насосах* жидкость приобретает дополнительную энергию, перемещаясь под силовым воздействием в камере, постоянно сообщаемой с входом и выходом насоса. Динамические насосы подразделяют на лопастные, где жидкость перемещается под воздействием лопастей вращающегося рабочего колеса, и насосы трения, в которых перемещение жидкости в камере обусловлено силами трения, возникающими при движении рабочего колеса, пластин, струй жидкости и т. д. В *объемных насосах* жидкость перемещается путем периодического изменения объема рабочей камеры, попеременно сообщаемой с входом и выходом насоса.

Основные характеристики любых насосов: подача Q ($\text{м}^3/\text{с}$; $\text{м}^3/\text{ч}$; $\text{л}/\text{с}$) и развиваемый ими напор H , измеряемый обычно в метрах.

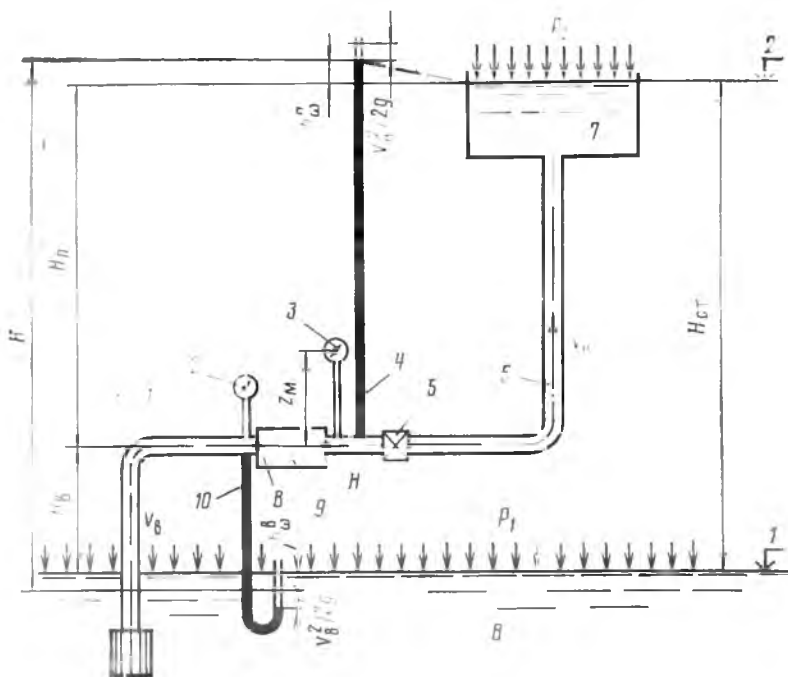


Рис. 9.2. Схема насосной установки:

1, 6 — всасывающий и напорный трубопроводы; 2 — вакуумметр; 3 — манометр; 4, 10 — пьезометры; 5 — задвижка; 7, 8 — верхний и нижний резервуары; 9 — насос

Рассмотрим работу насоса в составе насосной установки, перекачивающей жидкость из нижнего резервуара 7 (рис. 9.2) в верхний 7. Установка состоит из всасывающего трубопровода 1, насоса 9 и напорного трубопровода 6. Для простоты рассуждений резервуары примем открытыми, поэтому давление на поверхности жидкости в них равно атмосферному: $P_1 = P_2 = P_a$.

Напор H (м), развиваемый насосом, равен разнице удельных энергий в напорном и всасывающем патрубках (точки в и н на рис. 9.2), то есть

$$H = P_n/\rho g + v_n^2/2g - (P_v/\rho g + v_v^2/2g), \text{ или} \\ H = (P_n - P_v)/\rho g + (v_n^2 - v_v^2)/2g, \quad (9.1)$$

где P_v и v_v — давление (Па) и скорость (м/с) на входе в насос; P_n и v_n — на выходе из него; ρ — плотность жидкости, кг/м³; g — ускорение свободного падения, м/с².

Эта энергия расходуется на подъем жидкости на высоту $H_{\text{ст}} = H_{\text{в}} + H_{\text{н}}$ и преодоление гидравлических сопротивлений h_{ω} во всасывающем $h_{\omega}^{\text{в}}$ и напорном $h_{\omega}^{\text{н}}$ трубопроводах, что позволяет записать значение напора в виде

$$H = H_{\text{в}} + h_{\omega}^{\text{в}} + H_{\text{н}} + h_{\omega}^{\text{н}} = H_{\text{ст}} + h_{\omega}. \quad (9.2)$$

$H_{\text{ст}}$ называют *статическим напором* насосной установки.

Напор, развиваемый насосом, как видно из формулы (9.2), определяется положением уровней жидкостей в верхнем и нижнем резервуарах и потерями в трубопроводах, то есть не является постоянной величиной. Для его определения на всасывающем патрубке устанавливают прибор для измерения разрежения — вакуумметр, а на напорном — для измерения давления — манометр. Вакуумметр показывает разрежение во всасывающем патрубке насоса:

$$P_{\text{вак}} = P_{\text{а}} - P_{\text{в}}, \quad (9.3)$$

а манометр — избыточное давление в напорном патрубке на уровне центра манометра:

$$P_{\text{ман}} = P_{\text{в}} - P_{\text{а}} - \rho g z_{\text{м}}, \quad (9.4)$$

где $z_{\text{м}}$ — высота столба жидкости от центра манометра до точки его присоединения к напорному трубопроводу.

Найдя из формул (9.3) и (9.4) значения $P_{\text{в}} = P_{\text{а}} - P_{\text{вак}}$ и $P_{\text{н}} = P_{\text{ман}} + P_{\text{а}} + \rho g z_{\text{м}}$ и подставив их в формулу (9.1), получим

$$H = (P_{\text{ман}} + P_{\text{вак}}) / \rho g + z_{\text{м}} + (v_{\text{н}}^2 - v_{\text{в}}^2) / 2g. \quad (9.5)$$

Формула (9.5) позволяет оперативно контролировать напор насоса по показаниям приборов. Для определения скоростей $v_{\text{н}}$ и $v_{\text{в}}$ применяют соответствующие измеряющие устройства. Часто диаметры всасывающего и напорного патрубков отличаются незначительно, поэтому разностью скоростных напоров можно пренебречь, тогда напор насоса

$$H = (P_{\text{ман}} + P_{\text{вак}}) / \rho g + z_{\text{м}}.$$

Важной характеристикой насоса является мощность, затраченная на подъем жидкости с подачей Q под напором H . Поскольку $\rho g H$ — удельная избыточная энергия единицы объема жидкости, прошедшей через насос, то $\rho g H Q$ — работа, затраченная в единицу времени, то есть *полезная мощность* насоса. Если напор выражен в метрах, а подача — в $\text{м}^3/\text{с}$, то полезная мощность, кВт,

$$N_{\text{п}} = \frac{\rho g H Q}{102}. \quad (9.6)$$

Мощность N , потребляемая насосом от приводного двигателя, всегда больше полезной мощности, так как энергия расходуется дополнительно на преодоление гидравлических сопротивлений в самом насосе, компенсацию утечек жидкости через уплотнения, а также на преодоление сил трения в механических узлах и на контакте движущихся частей с жидкостью. Отношение полезной мощности N_0 насоса к потребляемой N — коэффициент полезного действия насоса $\eta = N_0/N$; оно всегда меньше единицы. Отсюда потребляемая мощность насоса (кВт) может быть определена по формуле

$$N = \frac{9810Q}{102\eta} \quad (9.7)$$

Мощность приводного двигателя должна быть больше потребляемой насосом мощности, так как часть энергии расходуется на преодоление сил трения в самом двигателе и механической передаче.

9.3. ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ И ХАРАКТЕРИСТИКИ ЛОПАСТНЫХ НАСОСОВ

9.3.1. ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ ЦЕНТРОБЕЖНОГО НАСОСА

В гидравлической практике наибольшее распространение получили динамические лопастные насосы — центробежные и осевые. Они относительно просты по конструкции, имеют небольшие габариты и обеспечивают большую подачу при достаточно высоких напорах. Схема наиболее распространенного типа насоса — центробежного — показана на рисунке 9.3.

Основной элемент такого насоса — рабочее колесо 11, насаженное на вал 2, вращаемый приводным двигателем. Колесо размещено в корпусе 5, имеющем входной — всасывающий 10 и выходной — напорный 14 патрубки. Находящаяся во входном патрубке жидкость, попадая на лопасти 16 рабочего колеса, отбрасывается центробежными силами к его периферии. При этом в патрубке возникает разрежение, и под действием атмосферного давления туда поступают новые порции перекачиваемой жидкости, а прошедшие через колесо — отводятся из камеры 6 насоса по выходному (напорному) патрубку в напорный трубопровод 7.

Литое рабочее колесо (см. рис. 9.3, б) представляет собой втулку 17 с дисковой стенкой 18 и изогнутыми лопастями 16, каналы между которыми перекрыты второй дисковой стенкой 18'. Каналы таким образом проходят внутри колеса от его цент-

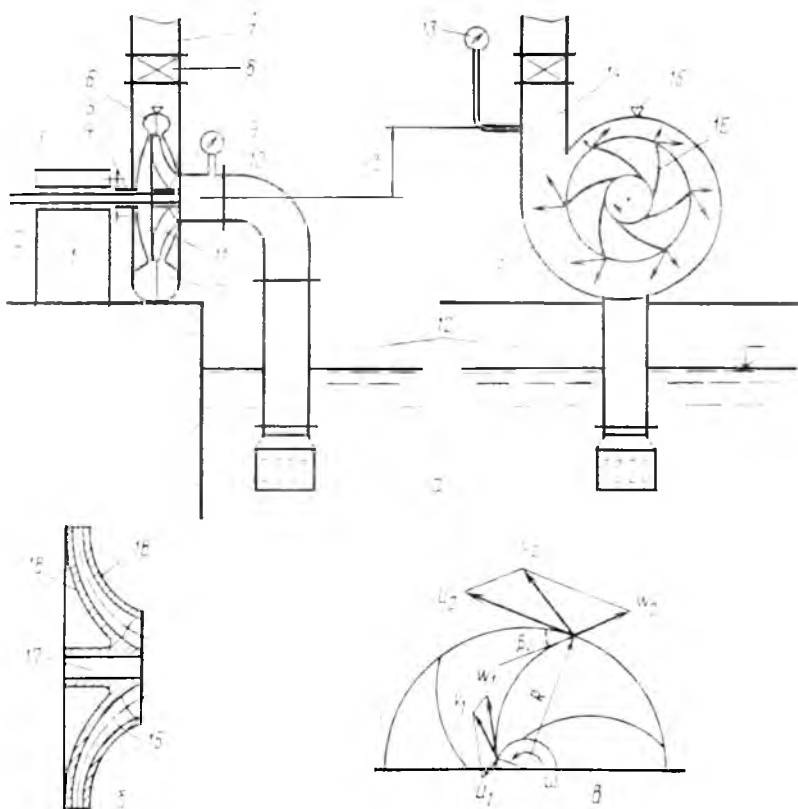


Рис. 9.3. Устройство и принцип работы центробежных насосов:

а, б — схемы устройства насоса и его рабочего колеса; *а* — распределение скоростей струйки жидкости в канале рабочего колеса; 1 — станина; 2 — вал; 3 — подшипники; 4 — сальник; 5 — корпус насоса, 6 — камера; 7 — напорный трубопровод; 8 — затвор; 9 — вакуумметр; 10 — всасывающий патрубком; 11 — рабочее колесо; 12 — всасывающий трубопровод; 13 — манометр; 14 — напорный патрубком; 15 — воронка; 16 — лопасти; 17 — фланец рабочего колеса; 18, 18' — дисковые стенки

ра к периферии, сообщаясь со всасывающим патрубком и камерой насоса.

Частица жидкости, попадая на лопасти рабочего колеса (см. рис. 9.3, *в*), участвует одновременно в двух движениях — переносном со скоростью (м/с) $u = \omega r$ (ω — угловая скорость вращения, с^{-1} ; r — радиус окружности, на которой частица находится в данный момент времени, м) и относительном — вдоль канала со скоростью w (м/с), перемещаясь от центра колеса к периферии. Скорость u направлена по касательной к окружности с радиусом r ; направление скорости w совпадает в каж-

дой точке с касательной к лопасти рабочего колеса. По мере увеличения радиуса r переносная скорость u возрастает, относительная же w , определяемая геометрией сечения канала, меняется незначительно. Результирующая скорость v_2 струйки, движущейся по каналу, на выходе из него определяется скоростями u_2 и w_2 и очертанием лопастей, то есть углом β_2 . Очевидно, удельная энергия жидкости на сходе струйки с лопасти пропорциональна квадрату результирующей скорости v_2 .

Направление движения потока в камере совпадает с касательной к внешней окружности рабочего колеса, тогда как скорость v_2 отклоняется от нее тем больше, чем выше относительная скорость w_2 , и возрастает с увеличением угла β_2 . Наличие поперечных скоростей в потоке ведет к потере энергии на турбулентное перемешивание жидкости и трение о стенки камеры.

Таким образом, поток, выходя из рабочего колеса, обладает большим запасом кинетической энергии, расходуемой в значительной мере бесполезно. Для преобразования ее в энергию потенциальную, отводящую камеру выполняют плавно расширяющейся, спиральной формы, постепенно уменьшая скорости жидкости.

9.3.2. ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЦЕНТРОБЕЖНЫХ НАСОСОВ

Рассмотренные в предыдущем параграфе параметры насоса (напор H , полезная мощность N_0) не остаются постоянными, изменяясь по мере изменения подачи. Зависимость напора от подачи при постоянной частоте вращения называют *рабочей характеристикой подачи* насоса, которая должна иметь вид линии, пересекающей оси координат (рис. 9.4). Убедиться в этом легко, анализируя параллелограммы скоростей жидкости на сходе с лопастей рабочего колеса (см. рис. 9.3. а). Напор развиваемый насосом, при постоянной частоте вращения

(при постоянном значении u_2 , так как частота вращения насоса обычно не меняется), тогда как подача зависит от относительной скорости w_2 . В случае закрытия задвижки 8 (см. рис. 9.3, а) на напорном трубопроводе подача прекратится — вектор w_2 превратится в нуль, и результирующая скорость v_2 достигнет максимума, совпадая по величине и направлению с u_2 . При этом насос будет развивать предельный напор (точка А на рис. 9.4, а). С ростом подачи (уменьшением сопротивления трубопроводов) возрастает и скорость w_2 , приводя к повороту вектора скорости v_2 . В пределе векторы v_2 займут положение, показанное на рисунке 9.3, а, оказавшись направленными по нормали к окружности рабочего колеса и стенкам камеры на-

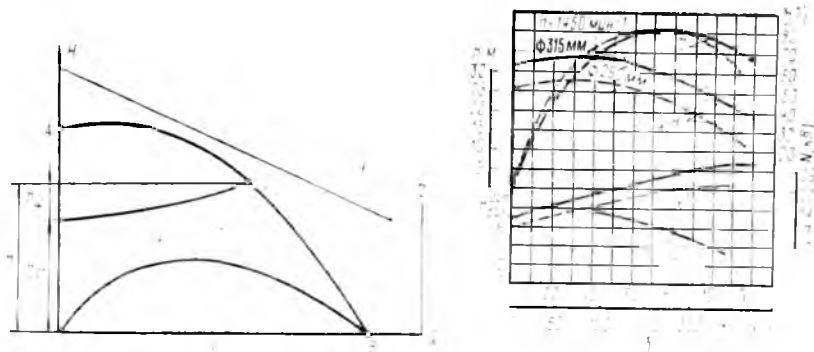


Рис. 9.4. Изменение параметров центробежного насоса в зависимости от подачи (а) и характеристика насоса (б):

1, 2 — теоретическая и рабочая характеристика подачи; 3 — кривая изменения КПД насоса; 4 — характеристика трубопровода; С — «рабочая точка»

соса. Очевидно, в этом случае большая часть энергии, передаваемой жидкости, будет гаситься в камере, а насос не будет создавать напора (точка В на рис. 9.4, а). В подобном режиме насос работает при отсоединенной напорной линии, когда поток свободно изливается из напорного патрубка.

Теоретически линия рабочей характеристики подачи 1 — прямая (см. рис. 9.4), однако в реальных условиях из-за непостоянства гидравлических потерь она принимает вид 2. Для каждого насоса ее определяют экспериментально.

Аналогично находят зависимости потребляемой мощности и КПД насоса от подачи: $N=f(Q)$ и $\eta=N_0/N=f_1(Q)$. Так как полезная мощность пропорциональна произведению QH , превращающемуся дважды в нуль (в точках А и В пересечения рабочей характеристики подачи с осями координат), кривая 3 $\eta=f_1(Q)$ имеет вид, показанный на рисунке 9.4.

Зависимости $H—Q$; $\eta—Q$ и $N—Q$ наносят на совмещенный график, приведенный на рисунке 9.4, б, называемый характеристикой насоса, из которого видно, что диапазон регулирования подачи насоса ограничен относительно узкой полосой, выделенной на кривой $H—Q$ отрезками вертикальных линий и соответствующей высоким значениям КПД. При выходе за пределы этого диапазона потери мощности быстро возрастают. С целью его расширения прибегают к уменьшению диаметра рабочего колеса насоса (обточке), снижая скорость u_2 на выходе из каналов, а значит, и напор, развиваемый насосом. Обычно на график наносят два семейства кривых — для насоса с необточенным колесом и при условии предельно допустимой обточки последнего (пунктирные кривые на рисунке 9.4).

9.3.3. ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ ОСЕВЫХ НАСОСОВ

Корпус осевого насоса (рис. 9.5, а) выполнен в виде трубы, в которой установлен полый обтекатель с лопатками направляющего (выправляющего) аппарата 2, служащими и для крепления обтекателя к корпусу. Сквозь обтекатель с установленными в нем подшипниками проходит вращающийся приводной вал, на котором закреплено рабочее колесо 1 с жестко фиксированными или поворотными лопастями (в последнем случае насос называют поворотнo-лопастным). Жидкость, попадая на лопасти рабочего колеса, движется по касательной к ним с постоянной по величине скоростью относительного движения w (рис. 9.5, б), одновременно вовлекаясь в переносное движение с окружной скоростью u . В отличие от центробежных насосов последняя остается постоянной от момента входа частицы жидкости на лопасть колеса до выхода с него. Удельная энергия потока растет за счет изменения угла β отклонения вектора скорости от вертикали, что увеличивает результирующую скорость v , но меньше, чем в центробежных насосах. Этим и обусловлена характерная особенность осевых насосов — высокая объемная подача при относительно небольших (до 20...25 м) напорах.

Для уменьшения потерь напора в насосе, связанных с наличием поперечной составляющей скорости потока при его закрутке на рабочем колесе, служат лопатки выправляющего ап-

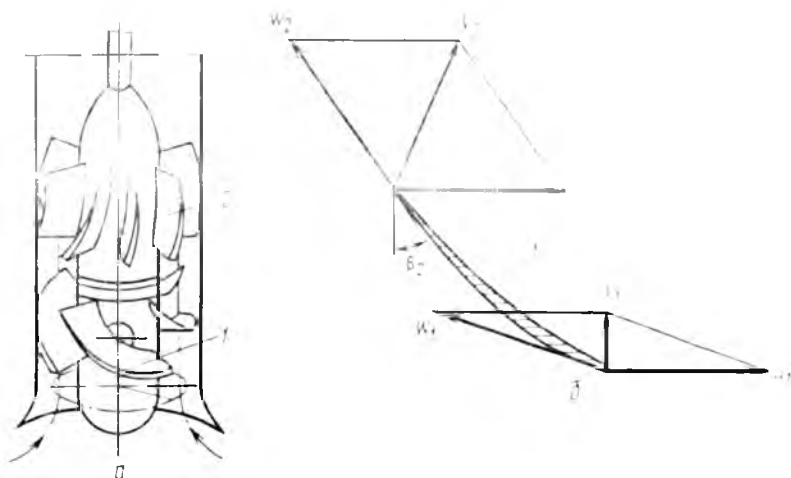


Рис. 9.5. Устройство и принцип работы осевого насоса:

а — схема осевого насоса; б — распределение скоростей струйки жидкости вдоль контура лопасти насоса; 1 — насос; 2 — лопатки выправляющего аппарата

парата. Лопатки установлены так, чтобы касательная к их входной кромке совпадала с направлением вектора скорости v_2 , а на выходной — была вертикальной.

Характерная особенность осевых (пропеллерных) насосов — уменьшение потребляемой мощности с ростом подачи, тогда как для насосов центробежных эта зависимость имеет противоположную тенденцию. Поэтому осевые насосы запускают при полностью открытой задвижке напорного трубопровода, а при пуске центробежных — закрывают ее, постепенно увеличивая подачу после набора насосом полных оборотов.

9.4. УСТРОЙСТВО НЕКОТОРЫХ ВИДОВ ДИНАМИЧЕСКИХ ЛОПАСТНЫХ НАСОСОВ

Лопастные динамические насосы получили наибольшее распространение в гидротехнической практике. Обладая высоким КПД, они способны развивать напор до 400 м, а при небольших напорах (8...12 м) — обеспечивать подачу до 25 м³/с и более.

Консольный насос одностороннего входа типа К показан на рисунке 9.3. Его рабочее колесо 11 закреплено на горизонтальном валу 2, вращающемся в подшипниках 3 станины 1. Корпус насоса 5 состоит из двух половин, имеющих вертикальную плоскость разъема. В корпусе размещен сальник 4, препятствующий утечке жидкости из полости насоса, в которой при работе создается высокое давление.

Для малых насосов не устраивают отдельной станины; рабочее колесо монтируют на валу электродвигателя, получая консольные моноблочные насосы типа МК. Насосы с большой подачей и значительными напорами делают с горизонтальным расположением колеса и вертикальным валом (типа В).

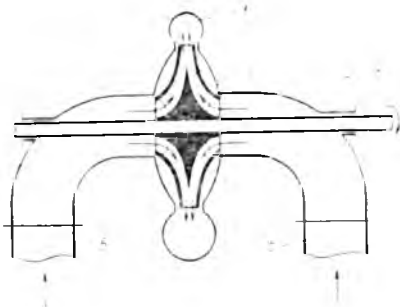


Рис. 9.6. Схема насоса двустороннего входа:

1 — спиральная камера; 2 — рабочее колесо; 3 — корпус; 4 — подшипники и сальник; 5 — вал; 6 — всасывающие трубы

Широкое применение получили центробежные насосы двустороннего входа типа Д (рис. 9.6). Рабочее колесо 2 такого насоса выполнено симметричным и насажено на вал 5, вращающийся в подшипниках 4 корпуса 3. Жидкость подводится двумя всасывающими патрубками, расположенными симметрично по обеим сторонам колеса, и, выбрасываясь в спиральную камеру 1, далее поступает в напорный трубопровод. Достоинства таких насосов: большая, по срав-

Рис. 9.7. Артезианский трехступенчатый насос:

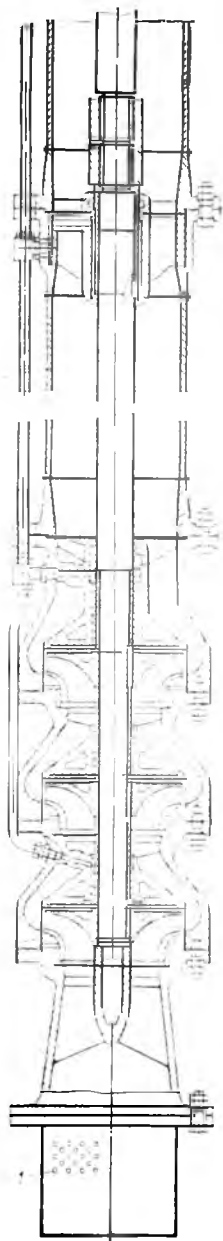
1 — приемная сетка; 2 — рабочее колесо; 3 — корпус; 4 — вал (трансмиссия)

нению с консольными, при равном диаметре рабочего колеса, подача и полная уравнированность последнего. Насос двустороннего входа конструктивно сложнее консольного, так как вал его рабочего колеса имеет две симметричные опоры, а корпус — сложную конфигурацию, чтобы объединить два всасывающих тракта (поз. б) в один.

Если необходимо получить очень большие напоры, используют многоступенчатые насосы типа М с последовательным соединением нескольких рабочих колес в общем корпусе. Жидкость, поступающая к первому рабочему колесу по всасывающему патрубку, выбрасывается в камеру, соединенную с входом колеса следующей ступени. Проходя через вторую, третью и так далее ступени, жидкость приобретает большой запас энергии и под высоким напором подается в напорный трубопровод.

Разновидность многосекционных — артезианские и погружные насосы типа А. Они приспособлены для забора воды из скважины и применяют их для водоснабжения, орошения и при водопонижении. Разница между ними в том, что артезианский насос приводится двигателем, расположенным на поверхности, через длинный вал (рис. 9.7), а у погружного двигатель размещен вместе с насосом. При этом весь агрегат, подвешенный на нагнетательной трубе, опускают в скважину, соединяя двигатель с источником электропитания специальным кабелем. Достоинство погружных насосов — возможность их установки в искривленных скважинах.

Кроме рассмотренных бывают и другие специальные центробежные насосы, предназначенные для перекачки загрязненных жидкостей и даже пульпы, содержащей достаточно крупные твердые включения.



Малой чувствительностью к загрязнению перекачиваемой жидкости отличаются и осевые насосы (пропеллерные типа О и поворотнo-лопастные типа ОП).

9.5. НАСОСНЫЕ УСТАНОВКИ И ИХ ОСНОВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ

Состав насосной установки и назначение ее элементов. Конструктивная схема насосной установки с центробежным насосом показана на рисунке 9.8. Установка состоит из насоса (поз. 3 и 7), снабженного вакуумметром *в* и манометром *М*, всасывающей трубы 4 с сеткой 6 для задержания плавающих тел. Во всасывающей трубе монтируют приемный клапан 5, предотвращающий утечку жидкости при выключенном насосе. Напорный трубопровод снабжают регулирующей задвижкой 8 и обратным клапаном 1, который, перекрывая трубопровод при внезапной (в случае аварии) остановке насоса, предотвращает его повреждение обратным током жидкости.

Запускают насос после заполнения его полости жидкостью, так как рабочее колесо, вращаясь в воздушной среде, не создает достаточного разрежения во всасывающем трубопроводе. Для заливки насоса служит воронка 15 (см. рис. 9.3, а) с кра-

ном в его корпусе. Если напорный трубопровод заполнен жидкостью, насос может быть залит с помощью перепускной трубки 2 (см. рис. 9.8). Крупные насосы заливают, откачивая из корпуса воздух вакуум-насосом. При этом жидкость, поднимаясь по всасывающему трубопроводу, заполняет корпус. Если насос размещен ниже уровня воды (см. рис. 8.3, а, 8.4, а), то предварительно его не заливают.

Параметры насосных установок и принципы подбора насосов и приводных двигателей. Основные параметры насосной установки: напор, подача и КПД. При

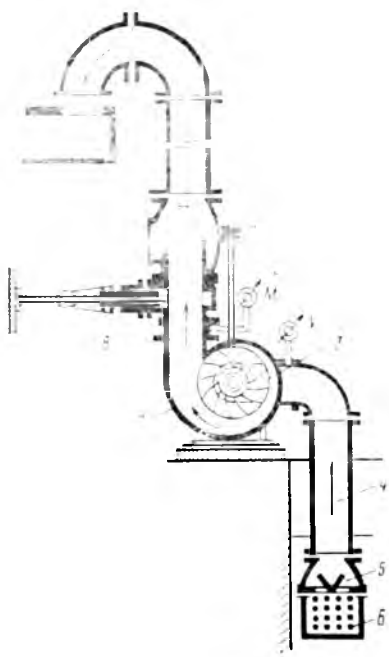


Рис. 9.8. Схема установки с центробежным насосом:

1 — обратный клапан; 2 — перепускная трубка; 3 — рабочее колесо; 4 — всасывающая труба; 5 — приемный клапан; 6 — предохранительная сетка; 7 — спиральная камера; 8 — задвижка

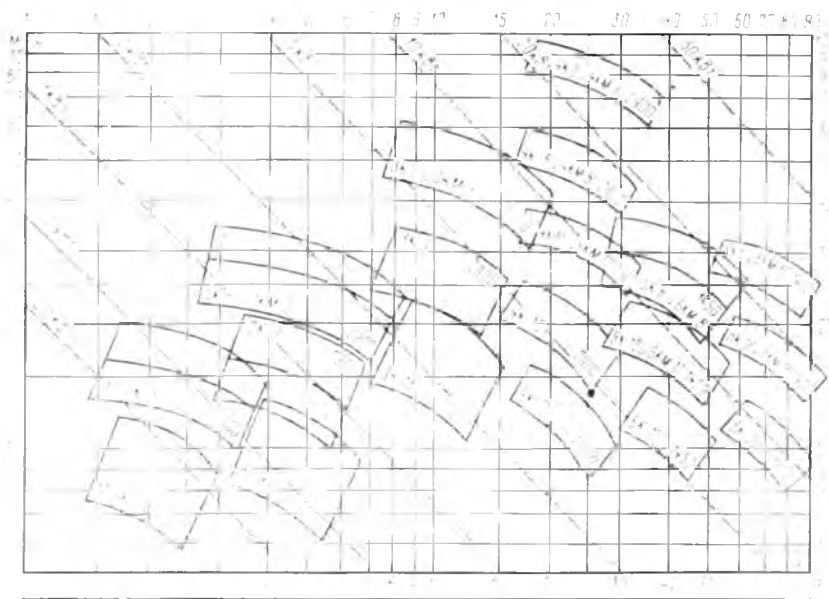


Рис. 9.9. Номенклатура консольных насосов типа К и моноблочных насосов типа КМ

проектировании установки обычно задаются расчетная подача и геометрический напор $H_{ст}$, являющиеся основой при подборе насоса. Полный напор, развиваемый насосом и определяемый по зависимости (9.1), должен быть не меньше расчетного напора насосной установки, складывающегося из постоянной величины $H_{ст}$ и потерь h_w , определяемых гидравлическими сопротивлениями трубопроводов. Для шероховатых труб при турбулентном режиме h_w (м) пропорциональны квадрату скорости v , поэтому можно записать

$$h_w = SQ^2,$$

где Q — подача (расход) установки, $м^3/с$; S — коэффициент, характеризующий гидравлические сопротивления трубопроводов ($с^2 \cdot м^{-6}$).

Исходя из этого, напор насосной установки можно выразить в виде

$$H = H_{ст} + SQ^2. \quad (9.8)$$

Эта зависимость — *характеристика трубопровода* и представляет собой параболу, которая может быть нанесена в координатах

натах $Q-H$ на основную характеристику насоса (см. рис. 9.4, поз. 4). Точка их пересечения определяет режим работы этого насоса на данный трубопровод и называется *рабочей точкой*. В ней подача насоса равна расходу трубопровода, а напор, развиваемый насосом, равен напору, необходимому для пропуска данного расхода через трубопровод.

Если известны характеристика трубопровода и расчетная подача, то есть рабочая точка, то насос подбирают, используя так называемые номенклатуры насосов. Одна из номенклатур показана на рис. 9.9, которая по существу и является сводным графиком рабочих характеристик $Q-H$ серийно выпускаемых насосов. Верхняя и нижняя стороны каждого из криволинейных четырехугольников — «косынок» представляют части кривых $Q-H$, соответственно для необточенного и максимально обточенного рабочих колес в пределах оптимальных КПД (на рис. 9.4, б это ограниченные отрезками вертикальных прямых части графиков $Q-H$). На каждой «косынке» указаны соответствующий ей тип насоса и расчетная частота вращения.

Для подбора насоса рабочую точку наносят на сводный график. При попадании его в нижнюю часть пространства «косынки» рабочее колесо необходимо обточить.

Ориентировочно оценить необходимую мощность приводного двигателя можно с помощью сводного графика-номенклатуры по положению рабочей точки между двумя соседними наклонными линиями равной мощности (рис. 9.9).

9.5.1 КАВИТАЦИЯ В НАСОСАХ. ДОПУСТИМАЯ ВЫСОТА ВСАСЫВАНИЯ НАСОСНОЙ УСТАНОВКИ

Напор насосной установки (см. рис. 9.3) складывается из высоты всасывания H_v и высоты нагнетания H_n , поэтому высота расположения насоса относительно уровней *жидкости* в верхнем и нижнем резервуарах может варьировать в известных пределах. Однако высота всасывания ограничена следующими условиями. При работе насоса во всасывающей патрубке возникает разрежение $P_{\text{вак}} = \rho g H_{\text{вак}}$, где $H_{\text{вак}}$ — вакуумметрическая высота всасывания;

$$H_{\text{вак}} = H_v + v_v^2 / 2g + h_{\omega}^v,$$

где v_v — скорость во всасывающем трубопроводе (м/с); h_{ω}^v — сумма гидравлических потерь в нем, м.

Если разрежение окажется по абсолютной величине больше давления жидкости P_1 (при открытом резервуаре — больше атмосферного), столб жидкости во всасывающей трубке разорвется, что сорвет работу насоса.

Однако полученная из этих соображений вакуумметрическая высота всасывания оказывается недопустимо большой, так как с понижением давления $P'_в$ при входе на лопасти рабочего колеса до давления насыщенных паров жидкости $P_{п.ж.}$ будет развиваться процесс кавитации, сопровождающийся сильным резким шумом, вибрацией, снижением КПД и интенсивным износом насоса. Условие недопущения кавитации имеет вид

$$P'_в - P_{п.ж.}$$

или

$$P_1/\rho g - H'_{вак} = P_1/\rho g - (H_в + v^2_в/2g + h^в_{\omega} + h'_{\omega}) \geq P_{п.ж.}/\rho g, \quad (9.9)$$

где $H'_{вак}$ и h'_{ω} — соответственно разрежение и гидравлические потери при входе на лопасти рабочего колеса; ρ — плотность жидкости, кг/м³; g — ускорение свободного падения, м/с².

Допустимая вакуумметрическая высота всасывания (допустимый вакуум во входном патрубке) $H_{вак}^{доп} = P_1/\rho g - h'_{\omega}$ и определяется экспериментально при стендовых испытаниях насосов. Кривая $H_{вак}^{доп} = \varphi(Q)$ — одна из важных характеристик насосов, и наносят ее обычно на совмещенный график (см. рис. 9.4, б).

Предельно допустимую высоту всасывания $\bar{H}_в$ согласно формуле (9.9) можно определить по зависимости

$$\bar{H}_в = (P_1/\rho g - h'_{\omega}) - (v^2_в/2g + h^в_{\omega}) - P_{п.ж.}/\rho g,$$

или

$$\bar{H}_в = H_{вак}^{доп} - (v^2_в/2g + h^в_{\omega}) - P_{п.ж.}/\rho g. \quad (9.10)$$

С целью предотвращения кавитации насосов стремятся снизить потери во всасывающем трубопроводе, уменьшая его длину и ограничивая скорости 1...1,5 м/с. Благоприятно расположение рабочего колеса насоса ниже уровня воды в нижнем резервуаре — насосная установка с отрицательной высотой всасывания.

9.6. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОСНОВНЫХ РАСЧЕТНЫХ ПАРАМЕТРОВ НАСОСОВ НАСОСНЫХ СТАНЦИЙ. РЕГУЛИРОВАНИЕ РАБОТЫ НАСОСОВ

9.6.1. ПОНЯТИЕ РАСЧЕТНОЙ ПОДАЧИ И РАСЧЕТНОГО НАПОРА

Основные характеристики насосной станции: максимальная расчетная подача и расчетный напор.

Исходным документом для проектирования насосных станций служит график водоподачи, то есть график изменения рас-

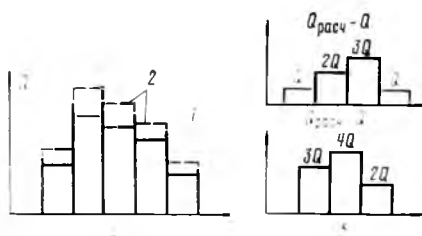


Рис. 9.10. Схемы к определению расчетной подачи станции и расчетного расхода насоса:

a — графики водопотребления (1) и водоподачи (2); *б* — определение расчетного расхода насоса

ходов станции по времени (рис. 9.10). График водоподачи строят на основе графика водопотребления, и, если в голове потребляющей системы отсутствует регулирующая емкость, он в целом повторяет очертания последнего. При этом ординаты графика водоподачи оказываются больше на величину потерь (на фильтрацию и испарение из открытых каналов) и расхода на технические надобности. Если имеется резервная (регулирующая) емкость (наливное водохранилище, канал большой протяженности, напорный бак в системе водоснабжения), то график водоподачи будет существенно отличаться от графика водопотребления. Так, в мелиоративных системах, где сроки водопотребления ограничены длительностью вегетационного периода, работа станции по заполнению наливного водохранилища начинается задолго до начала поливов. В этом случае график водоподачи будет равномерным, а его ординаты — значительно меньше максимального водопотребления, что снижает стоимость насосной станции.

Исходя из построенного с учетом указанных обстоятельств графика водоподачи, намечают расчетный расход одного насоса и число насосных агрегатов. За расчетный $Q_{расч}$ принимают расход Q_{min} , соответствующий минимальной ординате графика, либо меньший, обычно кратный последнему. Число агрегатов

$$n = Q_{max}/Q_{расч},$$

где Q_{max} — максимальная ордината графика водоподачи; $Q_{расч}$ — расчетный расход.

Напор, создаваемый насосами, тратится на преодоление геометрического напора и сопротивлений в трубопроводах, а если станция подает воду в закрытую сеть (водопроводную или оросительную), то и на поддержание в ней заданного свободного напора $h_{св}$:

$$H = H_{ст} + h_{\omega} + h_{св}. \quad (9.11)$$

Все составляющие напора изменяются во времени и зависят от уровней воды в водонисточнике и верхнем бассейне, подачи и режима работы потребляющей системы. За расчетный напор

при подаче в закрытую сеть принимают наибольший, полученный по формуле (9.11); при подаче в открытые емкости $H_{ст}$ и h принимают средними за период работы станции.

Расчетные подача и напор, являясь по существу координатами «рабочей точки» (см. 9.5), служат основой для подбора насосных агрегатов станций (как правило, все рабочие и резервные агрегаты принимают одинаковыми, что облегчает их ремонт и обслуживание и упрощает конструкцию станции).

Подачу станции в соответствии с заданным графиком обеспечивают включением в работу необходимого числа агрегатов, что позволяет, хотя и грубо, ее регулировать, поскольку практически невозможно выполнить условие кратности расчетного расхода всем ординатам графика водоподдачи. Полное соответствие подачи станции заданным условиям устанавливают, регулируя работу насосов.

9.6.2. РЕГУЛИРОВАНИЕ РАБОТЫ НАСОСОВ

Наиболее распространенный способ регулирования подачи насоса (рис. 9.11) — дросселирование (изменение гидравлического сопротивления напорного трубопровода). Подачу от Q_1 до Q_2 уменьшают закрытием задвижки, что обуславливает возрастание потерь напора, увеличивая крутизну характеристики трубопровода и перемещая ее из положения 3 в 4. Рабочая точка C_1^{n1} при этом занимает положение C_2^{n1} . Этот способ прост, однако имеет существенные недостатки: уменьшение подачи здесь связано с непроизводительными затратами энергии — ростом напора.

Более выгодное по расходу энергии — регулирование работы насоса изменением частоты вращения n рабочего колеса. Сущность этого способа состоит в следующем. Известно (см. 9.3.1), что подача насоса пропорциональна относительной скорости ω_2 , а напор — квадрату результирующей скорости u_2 на выходе струйки из канала рабочего колеса. Скорости u и ω прямо пропорциональны скорости или частоте вращения последнего, и геометрическая их сумма — вектор v — также пропорциональна n .

Отсюда можно сделать вывод, что при неизменных очер-

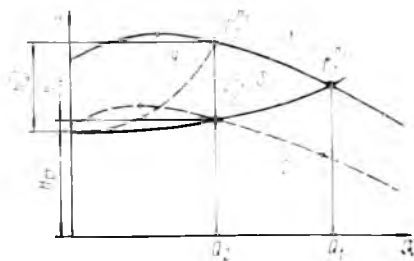


Рис. 9.11. Способы регулирования подачи насоса:

1, 2 — рабочие характеристики насоса при разных скоростях вращения рабочего колеса; 3, 4 — характеристики трубопровода при разных положениях регулирующей задвижки

таниях рабочего колеса параметры насоса определяются только скоростью его вращения, то есть

$$Q = K_1(n); H = K_2(n^2); N = K_3(n^3), \quad (9.12)$$

где K_1 , K_2 и K_3 — постоянные коэффициенты, определяемые геометрией рабочего колеса.

Из формул (9.12) следует, что с изменением частоты вращения от n_1 до n_2

$$Q_1/Q_2 = n_1/n_2; H_1/H_2 = n_1^2/n_2^2; N_1/N_2 = n_1^3/n_2^3. \quad (9.13)$$

С уменьшением скорости вращения ($n_2 < n_1$) рабочая характеристика насоса займет новое положение (поз. 2 на рис. 9.15), и при неизменной характеристике трубопровода 3 требуемое снижение подачи от Q_1 до Q_2 будет достигнуто с потерями напора $h_w^{n_2}$, значительно меньшими, чем с использованием дроселирования — $h_w^{n_1}$.

Этот способ может быть просто реализован в передвижных насосных станциях, где в качестве приводных применяют двигатели внутреннего сгорания с широким диапазоном регулирования частоты вращения.

Описанные способы регулирования в равной степени применимы как для центробежных, так и для осевых насосов. Дополнительные возможности имеют насосы с поворотными лопастями рабочего колеса. Здесь экономичного регулирования достигают установкой соответствующего заданному режиму подачи угла поворота лопастей.

9.6.3. ПАРАЛЛЕЛЬНАЯ И ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНАЯ РАБОТА НАСОСОВ

При регулировании подачи насосной станции включением того или иного числа агрегатов простое суммирование их расходов возможно лишь когда каждый насос работает на свой напорный трубопровод. Если на один трубопровод работают одновременно два или несколько насосов, то их общая подача будет меньше, чем сумма подач каждого в отдельности.

Параллельная работа (на один трубопровод) двух одинаковых насосов показана на рисунке 9.12, а. Точки суммарной их характеристики (1+2) в этом случае получают суммированием подач каждого насоса при фиксированных напорах ($Q = Q_1 + Q_2$). Так же строят суммарную характеристику при большем числе насосов, в том числе и имеющих разные рабочие характеристики.

Общая подача Q_{1+2} меньше $Q = Q_1 + Q_2$, так как с увеличением расхода возрастают потери напора в трубопроводе. Объединение подач нескольких насосов на один трубопровод, позволяя

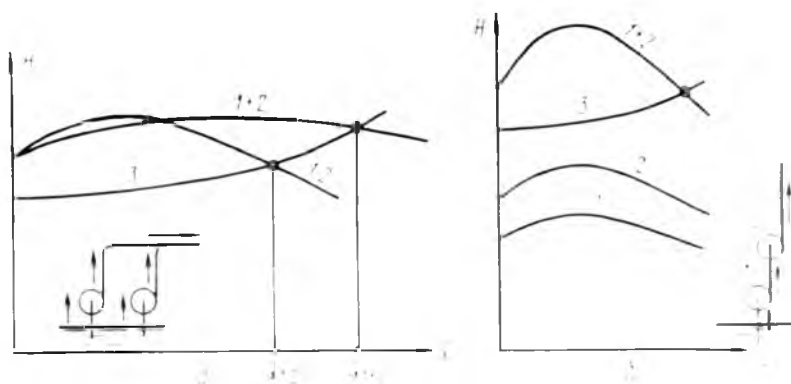


Рис. 9.12. Работа насосов при параллельном (а) и последовательном (б) соединении:

1, 2 — рабочие характеристики каждого из насосов; 1+2 — суммарная рабочая характеристика; 3 — характеристика трубопровода

уменьшить число трубопроводов, приводит к непроизводительным затратам энергии; с увеличением напора повышаются и напряжения в трубопроводе, то есть возникает необходимость его усиления.

Очевидно, решение об экономически целесообразном числе насосов, работающих на один трубопровод, может быть принято только на основе технико-экономического сравнения вариантов.

Говоря о регулировании работы насосов и насосной станции в целом, мы подразумевали под ним целенаправленное изменение подачи. Однако иногда необходимо регулирование напора насосной станции, когда напор имеющегося насоса недостаточен для преодоления заданной высоты поднятия воды. Повышение напора возможно либо увеличением частоты вращения насоса, либо последовательным включением двух центробежных насосов (рис. 9.12, б). Суммарную характеристику (1+2) получают суммированием напоров при фиксированной подаче ($H = H_1 + H_2$).

9.7. СОСТАВ И КОМПОНОВКА СООРУЖЕНИЙ УЗЛОВ МАШИННОГО ВОДОПОДЪЕМА

Основное сооружение любого узла машинного водоподъема — насосная станция.

Остальные элементы узла служат для отбора воды из водисточника, ее предварительной очистки, транспортирования к всасывающим трубам насосных установок и подачи под напо-

ром непосредственно к месту потребления или водовыпускному сооружению, сопрягающему напорные трубопроводы с открытым водоприемником — каналом.

Ниже рассмотрены некоторые возможные компоновочные схемы узлов машинного водоподъема для орошения с забором из рек, водохранилищ и каналов, а также узлов осушительных систем.

9.7.1. КОМПОНОВКА УЗЛОВ ОРОСИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ С ЗАБОРОМ ВОДЫ ИЗ РЕК И ВОДОХРАНИЛИЩ

При заборе воды из рек и водохранилищ различают *береговые* и *русловые* компоновочные схемы узлов. В первом случае водозаборное сооружение размещают вблизи уреза воды в водоисточнике, во втором — выносят в русло (или водохранилище), в зону больших глубин. Насосная станция при любом расположении водозабора может быть совмещена с ним в едином блоке, тогда говорят о *совмещенной* компоновке, либо выполнена на удалении от него. В последнем случае компоновку называют *раздельной*.

Береговая раздельная компоновка. Эта компоновка характерна для крупных узлов, забирающих воду из рек с широкой поймой, водохранилищ и крупных магистральных каналов при небольшом диапазоне колебаний уровней в водоисточнике. Насосную станцию в этом случае располагают у коренного берега реки или в зоне резкого изменения уклона местности, а воду к ней подводят открытым каналом либо галереей, отбирая из водоисточника с помощью одного из известных типов водозаборов (см. 8.1 и рис. 9.1, б). В этой схеме аванкамера 7 предназначена для сопряжения канала 3 с водоприемником насосной станции 4.

При высоких поймах и значительных колебаниях уровней в водоисточнике усложняется конструкция водозабора и возрастает глубина подводящего канала, что повышает стоимость сооружения. В этих условиях рациональной может оказаться береговая раздельная схема компоновки с расположением насосной станции вблизи берега и более длинным, чем в предыдущей схеме, напорным трубопроводом.

Береговая совмещенная компоновка. Эту компоновку используют при высоких крутых берегах, значительных колебаниях уровней в водоисточнике и достаточно прочных грунтах, слагающих берег (рис. 8.4, а). В этой схеме водозабор конструктивно объединен со зданием насосной станции в виде колодца, врезанного в крутой берег реки.

Береговые компоновочные схемы целесообразны, если возможно устройство узла на вогнутом участке речного берега, где

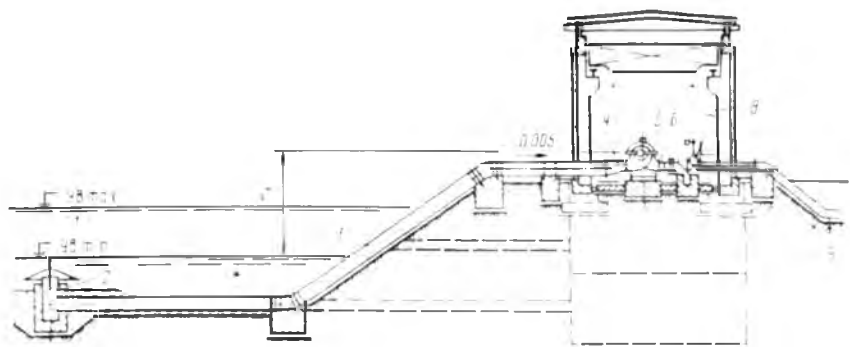


Рис 9.13. Конструктивная схема узла с русловой раздельной компоновкой:

1 — река, водохранилище; 2 — затопленный водозабор; 3 — всасывающий трубопровод; 4 — косяк вставка; 5 — монтажная вставка; 6 — обратный клапан; 7 — задвижка; 8 — здание насосной станции; 9 — напорный трубопровод

создаются достаточные глубины и обеспечивается забор осветленной воды. Они могут быть успешно использованы и при заборе из небольших водохранилищ с крутыми берегами и слабо развитыми вдольбереговыми течениями.

В других случаях более рациональными оказываются русловые компоновки узлов.

Раздельная русловая компоновка. В этих схемах водозабор вынесен в русло (или водохранилище), в зону больших глубин и соединен всасывающим трубопроводом, проложенным по дну, с насосной станцией. Водозабор делается затопленного или башенного типа с сетчатой защитой; его отверстия располагают на глубине, предотвращающей захват в трубопровод молоди рыб, обитающей в верхних слоях (рис. 9.13).

В длинном всасывающем трубопроводе гидравлические потери значительны, что ухудшает параметры насосной станции и вызывает опасность возникновения кавитации при низком уровне водоисточника. Более благоприятна в этом отношении схема, где водозабор связан самотечным трубопроводом с береговым колодезем, являющимся по существу водоприемником насосной станции. Береговой колодезь может быть выполнен отдельно от насосной станции (рис. 8.3, б) либо конструктивно объединен с ней.

Русловая совмещенная компоновка. В условиях затопляемой широкой поймы, сложенной слабыми грунтами, при большом диапазоне колебаний уровня, малых глубинах в прибрежной зоне и значительной подаче рациональна русловая совмещенная компоновка (рис. 9.14). В этой схеме здание насосной станции башенного типа устраивают в зоне достаточных глубин, совме-

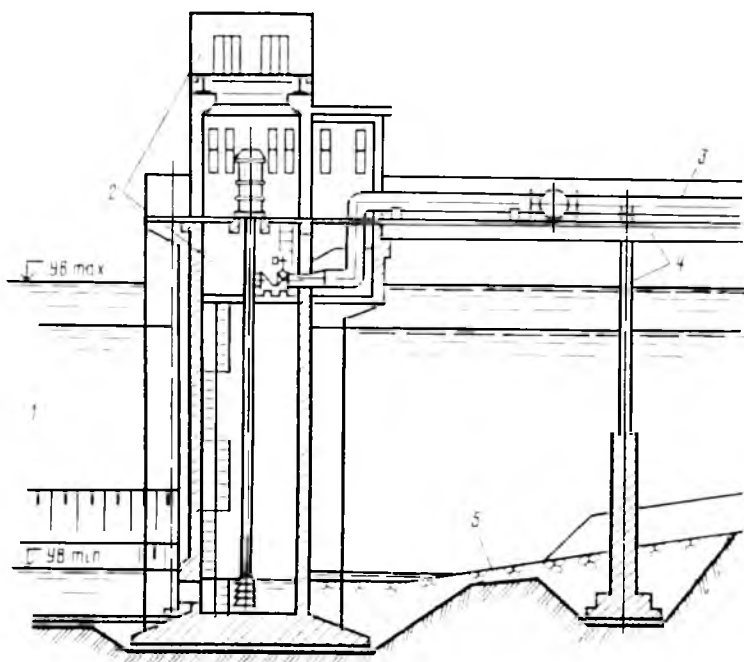


Рис. 9.14. Конструктивная схема узла с русловой совмещенной компоновкой:

1 — река, водохранилище; 2 — насосная станция, совмещенная с водозабором; 3 — напорный трубопровод; 4 — служебный мостик; 5 — защитное покрытие из каменной наброски

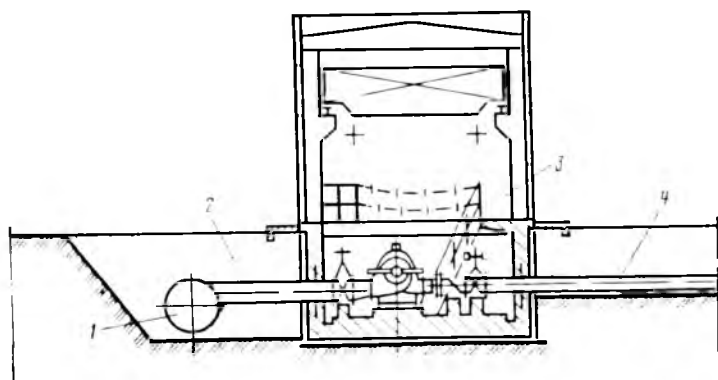


Рис. 9.15. Конструктивная схема насосной станции с забором воды из ВБ плотинного гидроузла:

1 — труба водоспуска; 2, 4 — всасывающий и напорный трубопроводы; 3 — здание насосной станции

щая его с водозабором, а напорный трубопровод прокладывают на мостовых опорах или по дну реки.

Значительные особенности имеет компоновка узлов машинного водоподъема, расположенных в НБ плотинного гидроузла (см. рис. 8.1, поз. 3). Используют эту схему обычно при небольших напорах, создаваемых плотиной, и глубокой сработке ВБ. Насосную станцию располагают непосредственно за водоспуском либо на некотором удалении от него, с подводом воды к насосу самонапорным трубопроводом, врезанным в напорную трубу водоспуска (рис. 9.15). Аналогично решают компоновку узлов подкачки на напорных мелноративных или водопроводных системах.

9.7.2. КОМПОНОВКА УЗЛОВ ОРОСИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ С ЗАБОРОМ ВОДЫ ИЗ КАНАЛОВ

Для таких узлов характерны относительно малые колебания уровней и отсутствие в потоке крупных донных наносов. Их выполняют обычно по четырем основным схемам (рис. 9.16): прямой водозабор при совмещенной (схема *а*) и раздельной (схема *б*) компоновках сооружений с подводом воды открытым каналом без регулирующего сооружения в головной части, и боковой водозабор при совмещенной или раздельной компоновках (схемы *в*, *г*).

Схемы *а*, *б* с прямым водозабором применяют в условиях равнинной местности, располагая насосную станцию вблизи зоны сосредоточенного перепада высот; схемы *в*, *г* удобны, когда магистральный канал — водоисточник — трассируют по косогору, либо при заборе воды из оросительных каналов младших порядков с подачей непосредственно в закрытую оросительную сеть.

Раздельную компоновку водоприемника 3 и насосной станции 5 применяют обычно при насосах с горизонтальным валом, когда из-за больших плановых размеров агрегатов ширина станции значительно превышает ширину подводящего канала (рис. 9.16, *б*, *г*; 9.17, *а*).

Совмещенную компоновку делают обычно на крупных узлах с осевыми или вертикальными центробежными насосами, имеющими относительно небольшие горизонтальные размеры, что позволяет сделать здание насосной станции компактным, совместив его с водоприемником (рис. 9.17, *б*).

9.7.3. КОМПОНОВКА УЗЛОВ ОСУШИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ

Здесь можно выделить два типа узлов. Первые применяют на системах водоснабжения для перекачки грунтовых вод, отводимых с подтопленной или обвалованной территории закры-

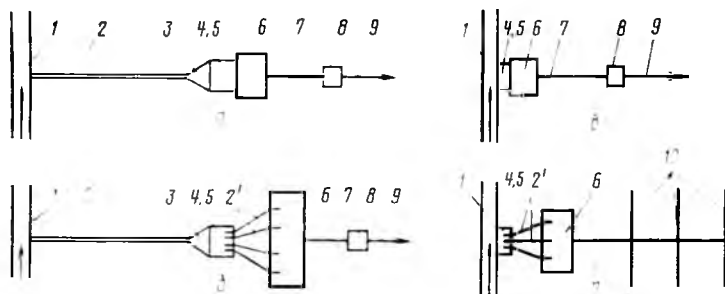


Рис. 9.16. Схемы компоновки узлов машинного водоподъема при заборе воды из каналов:

а, б — совмещенная и раздельная компоновки — прямой водозабор; *в, г* — то же, боковой водозабор; 1 — водосточник; 2 — канал; 2' — всасывающий трубопровод; 3 — аванкамера; 4 — водозабор; 5 — водоприемное сооружение; 6 — насосная станция; 7 — напорный трубопровод; 8 — водовыпускное сооружение; 9 — водоприемник; 10 — напорная сеть

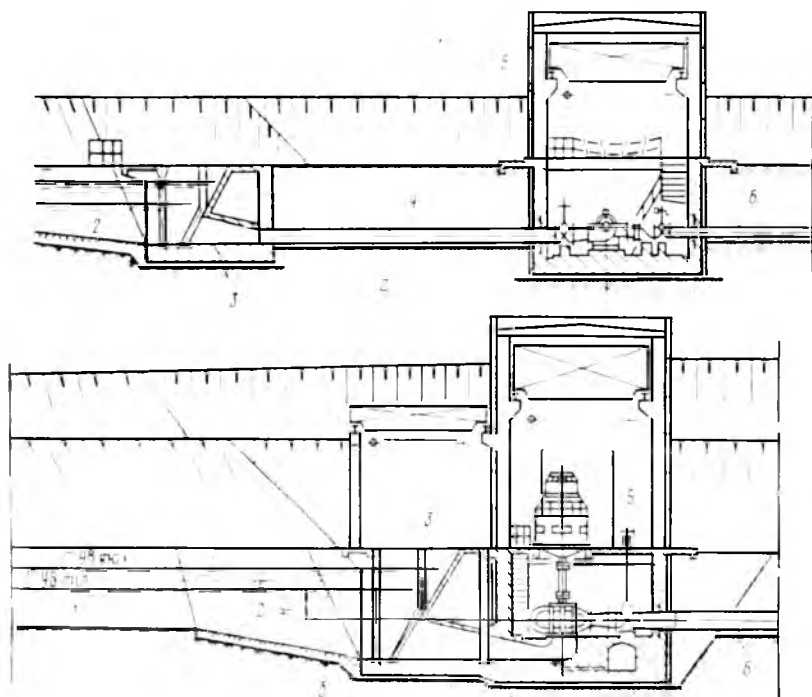


Рис. 9.17. Конструктивные схемы узлов раздельной (*а*) и совмещенной (*б*) компоновки:

1 — канал; 2 — аванкамера; 3 — водоприемное сооружение; 4 — всасывающий трубопровод; 5 — здание насосной станции; 6 — напорный трубопровод

той либо открытой дренажной сетью. Вторые используют для отвода поверхностных вод с защищаемых территорий или с огражденных, периодически затопливаемых площадей, примерами которых могут служить польдерные системы.

Узлы водоподъема систем водопонижения с закрытой дренажной сетью делают обычно подземными, совмещенного типа; в случае открытого дренажа их часто выполняют с раздельным расположением водоприемника и насосной станции, подобно рис. 9.17, а, устраивая в концевой части дренажного коллектора. При большой площади осушаемой территории строят несколько узлов водоподъема, чтобы обеспечить равномерное понижение уровня грунтовых вод. Особенность таких узлов — малые расходы при достаточно больших высотах перекачивания, поэтому для поддержания заданного уровня в водоприемнике станции насосы должны работать в неблагоприятном режиме многократных кратковременных включений. Улучшают работу насосов, вводя в состав узлов аккумулирующие емкости (резервуары в закрытых либо бассейны в системах открытого дренажа).

Для узлов водоподъема, отводящих поверхностные воды, характерны большие колебания напоров и расходов воды в различные периоды времени. Так, если в паводковый период уровень в реке-водоприемнике на 2...3 м превышает отметки осушаемой территории, то в межень он ниже отметок поверхности, и вода отводится самотеком. Такие узлы выполняют обычно совмещенного типа, объединяя водоприемник со зданием станции. На польдерных системах воду сбрасывают открытым каналом, устраивая рядом с насосной станцией снабженные затворами шлюзы свободного истечения либо делая здание станции проточным.

9.8. УСТРОЙСТВО УЗЛОВ МАШИННОГО ВОДОПОДЪЕМА

В составе узла машинного водоподъема можно выделить три группы сооружений разного функционального назначения. Первая — сооружения для отбора воды из водисточника и доставки ее к всасывающим трубам насосной станции (водозаборные сооружения, каналы и самотечные трубопроводы, аванкамеры и водоприемные сооружения станции). Вторая — собственно насосная станция, обеспечивающая повышение напора воды до заданных значений. Третья — сооружения для транспортировки воды под давлением непосредственно к потребителю либо к открытому водоприемнику и сопряжения напорного и безнапорного потоков (напорные водоводы и водовыпускные сооружения). Наиболее отчетливо это видно на примере круп-

ных объектов (см. рис. 9.1, б). В зависимости от назначения узла и схемы его компоновки функции сооружений внутри групп и даже между ними можно совмещать.

9.8.1. ВОДОЗАБОРНЫЕ, ТРАНСПОРТИРУЮЩИЕ И ВОДОПРИЕМНЫЕ СООРУЖЕНИЯ

Водозаборы с использованием открытых каналов или галерей для подвода воды к насосной станции являются гидротехническими сооружениями общего назначения и достаточно подробно представлены в разделе 8.1. Рассмотрим особенности русловых и береговых водозаборов, подающих воду в напорные самотечные или всасывающие трубопроводы.

Русловые водозаборы выполняют затопленного и незатопленного типов. Первые применяют для сооружений малой и средней подачи и подразделяют на защищенные и незащищенные.

Незащищенный водозабор — это наклонный или вертикальный трубчатый стояк с раструбом, перекрытым решеткой (рис. 9.18, а). Такие водозаборы сооружают, если нет опасности их повреждения судами, плавающими телами и льдинами. Раструб устанавливают против течения, делая решетку слегка наклонной или вертикальной, чтобы облегчить ее очистку от сора граблями или багром. При очень малых глубинах входное сечение водозабора может быть расположено в горизонтальной плоскости (см. рис. 9.13), чтобы обеспечить минимально необходимое по условиям предотвращения захвата воздуха заглубление. Скорости на входе в водозабор принимают такими, чтобы исключить захват молоди рыб.

На судоходных или лесосплавных реках устраивают затопленные водозаборы защищенного типа, представляющие ряжевые, свайные или массивные бетонные оголовки, предохраняющие входной раструб от повреждения (рис. 9.18, б).

В узлах большой и средней производительности русловые водозаборы обычно делают незатопленными, башенного типа, круглые или удлиненные в плане. В них делают один или несколько рядов входных отверстий, защищенных решетками и сетками и снабженных затворами. Иногда их совмещают с насосной станцией, как показано на рисунке 9.14.

Береговые водозаборы могут быть раздельной и объединенной компоновки. При первой береговой колодец (см. рис. 8.3, б) устраивают на незатопляемом берегу, соединяя с водозабором затопленного типа самотечным трубопроводом. Береговой колодец, являясь частью водозабора, служит одновременно и водоприемным сооружением насосной станции. Береговой водозабор объединенной компоновки выполняют обычно в виде мас-

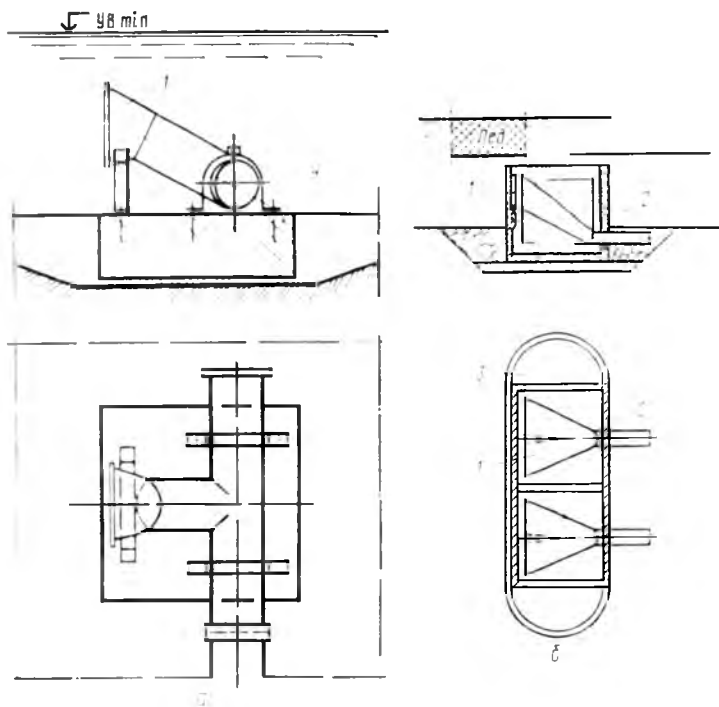


Рис. 9.18. Руслловые затопленные водозаборы:

а — незащищенного; *б* — защищенного типа; 1 — входная ворска; 2 — опалубка-понтон; 3 — заполнение бетоном; 4 — фундаментная плита

сивной камеры, частично врезанной в берег и выступающей в русло одной стороной, в которой располагают водоприемные стверстия (см. рис. 8.3, *а*).

Самотечным трубопроводом, уложенным по дну водоема при расположении водозабора в русле или водохранилище, его соединяют с водоприемным сооружением станции или с береговым колодцем. Трубопровод устраивают из железобетонных, асбоцементных или стальных труб, прокладывая их в неглубокой траншее на 0,5...1 м ниже отметки дна. Траншеей от размыва сверху защищают каменной наброской. Скорость воды в трубопроводе назначают 0,7...1,5 м/с. Число ниток самотечного трубопровода принимают не менее двух, чтобы исключить полное прекращение подачи в аварийных ситуациях.

К *всасывающему трубопроводу*, длину которого обычно ограничивают 30...50 м (см. рис. 9.13), русловый водозабор подключают непосредственно при небольших подачах и возможно-

сти расположения станции вблизи берега. Всасывающий трубопровод выполняют из тех же материалов, что и самотечный. Каждая его нитка работает, как правило, на один насос, что уменьшает гидравлические потери. Скорости в трубах назначают 0,7 ... 2 м/с. Всасывающую линию прокладывают по кратчайшему расстоянию с непрерывным подъемом к насосу, чтобы исключить встречное движение выделяющегося из воды воздуха и образования в трубах воздушных пузырей.

В узлах малой подачи всасывающий трубопровод оборудуют приемным клапаном (см. рис. 9.8), если насос перед запуском требует заливки водой.

Водоприемные сооружения насосных станций могут быть двух видов: закрытые и открытые. Первые представляют упомянутые выше береговые колодцы, которые являются достаточ-

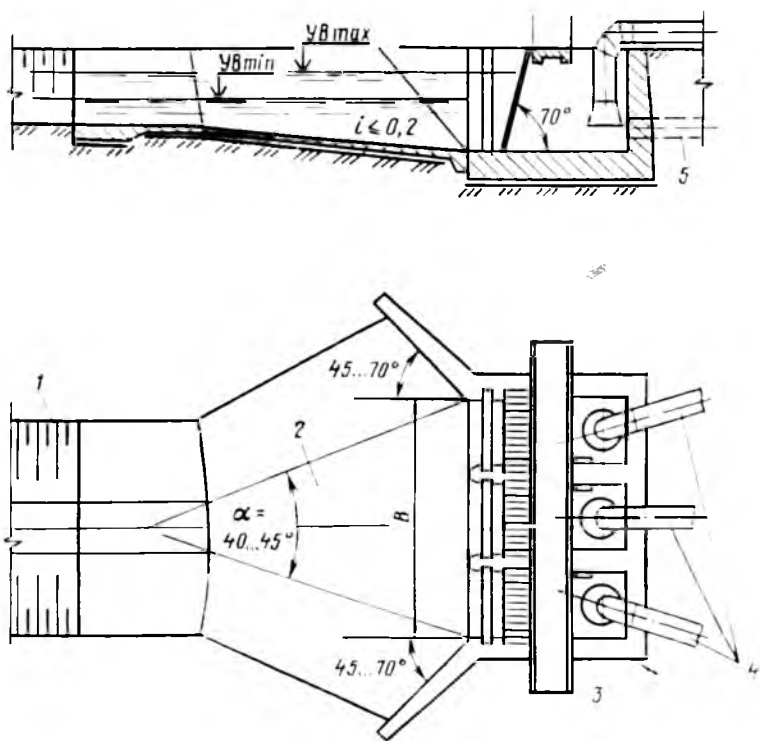


Рис. 9.19. Конструктивная схема аванкамеры и водоприемного сооружения насосной станции:

1 — подводящий канал; 2 — аванкамера; 3 — водоприемное сооружение; 4 — всасывающие трубопроводы; 5 — вариант горизонтального расположения всасывающего трубопровода

но сложным и дорогим инженерным сооружением. Для удешевления узла водоподъема его часто совмещают с насосной станцией (см. рис. 8.3, а, 8.4, а). Водоприемные сооружения второго вида применяют в узлах с открытым подводящим каналом (см. рис. 9.17, а). Это коробчатая железобетонная конструкция без передней стенки, снабженная сороудерживающими и рыбозащитными устройствами и затворами для осушения при осмотре и ремонте. Ширина водоприемного сооружения зависит от числа ниток всасывающей линии и необходимости создания благоприятных гидравлических условий.

Обычно всасывающие трубопроводы врезаются в заднюю стенку водоприемного сооружения (см. рис. 9.17, а), но при небольших подачах трубы можно опускать вдоль этой стенки, выполненной вертикальной (рис. 9.19) или с наклоном от канала.

Как правило, ширина водоприемного сооружения оказывается значительно больше ширины канала по дну, а дно его — ниже дна канала, чтобы обеспечить необходимое заглубление входных отверстий всасывающих труб. Каналы с водоприемными сооружениями сопрягают аванкамерами — плавно расширяющимися и углубляющимися участками канала (см. рис. 9.19).

9.8.2. НАСОСНЫЕ СТАНЦИИ

Конструкция здания насосной станции определяется в первую очередь типом применяемых насосов и перепадом высот поверхности земли и уровнем воды в водонсточнике.

При малой подаче и небольшой высоте всасывания (до 5 м) широко используют насосные станции *незаглубленного типа* (см. рис. 9.13) с отдельными фундаментами под насосы и вспомогательное технологическое оборудование. Верхнее строение станции должно обеспечивать защиту от атмосферных воздействий и удобство монтажа и ремонта агрегатов. Высота здания определяется необходимостью устройства грузоподъемных средств, позволяющих свободно транспортировать элементы насосных агрегатов от монтажной площадки (части здания, предназначенной для укрупнительного монтажа и ремонта гидросилового оборудования) до места установки.

Здание незаглубленной станции чаще всего выполняют каркасного типа со сборными железобетонными колоннами, заполняя проемы каркаса панелями или кирпичом. В продольных стенах устраивают окна, в торцовой, со стороны монтажной площадки, — ворота для въезда машин под разгрузку краном. В мелиорации широко применяют насосные станции заводского изготовления, в которых гидросиловое и энергетическое оборудование смонтировано на жесткой металлической раме; на ней

собиран и металлический каркас верхнего строения, обшитый листовыми материалами. Такую станцию привозят и устанавливают на заранее подготовленное основание, подключая к всасывающему и напорному трубопроводам и сети энергоснабжения.

При значительных колебаниях уровня в водоисточнике и слабых грунтах основания сооружают *полузаглубленные станции камерного типа* (см. рис. 9.17, а). Фундамент такой станции выполнен в виде железобетонной плиты, образующей вместе с подземной частью стен жесткую коробку — камеру. Плита служит фундаментом и для гидросилового и вспомогательного оборудования. Трубопроводы пропускают через отверстия большого диаметра в стенах, заполняя зазоры мягкими материалами (глина, пакля и т. д.), допускающими независимость осадок здания и труб. Если пол станции заглублен под уровень грунтовых вод, то делают наружную гидроизоляцию и дренаж подземной части здания, а внутри него — дренажную систему с откачкой профильтровавшейся воды. Здание большой протяженности разрезают поперечными швами для уменьшения напряжений, вызванных осадками основания. Верхнее строение полузаглубленной станции устраивают так же, как для незаглубленных, размещая монтажную площадку на уровне поверхности земли.

Камерные насосные станции могут быть с сухой и мокрой камерой. В первом случае (см. рис. 9.17, а) она служит помещением для установки насосов, вода к которым подводится по трубопроводам. Во втором — камера выполняет функции и водоприемного сооружения, а насосы размещены на повышенных отметках либо затоплены.

Разновидностью камерных являются *шахтно-камерные заглубленные* (по типу колодца) станции (см. рис. 8.4, а) и *башенные*, применяемые при совмещенной русловой или береговой компоновке (см. рис. 9.14).

Здания станций большой подачи с мощными вертикальными центробежными или осевыми насосами делают *блочного типа*. Фундаментом станции является массивный бетонный блок, служащий одновременно фундаментом для насосного оборудования. В теле блока проходят и всасывающие линии насосов (см. рис. 9.17, б). Водоприемные сооружения станции такого типа обычно выполняют как единое целое с ее зданием и снабжают затворами, позволяющими отключать всасывающие трубы для осмотра и ремонта без осушения всей водоприемной камеры. Монтажную площадку блочных насосных станций устраивают на отметке поверхности земли. В насосных станциях средней и большой подачи управление агрегатами выносят на общий пульт, а сама станция представляет промышленное

предприятие со всем комплексом технологических, ремонтных и бытовых помещений и систем.

При больших колебаниях уровня в водоисточнике, малой и средней подаче и слабых грунтах, слагающих берега, применяют плавучие насосные станции (см. рис. 8.4, б). Их мобильность позволяет использовать одну станцию для питания поочередно нескольких объектов, имеющих регулирующие емкости.

9.8.3. НАПОРНЫЕ ТРУБОПРОВОДЫ И ВОДОВЫПУСКНЫЕ СООРУЖЕНИЯ

Напорные трубопроводы насосных станций выполняют из железобетонных, асбестоцементных или стальных труб. Первые применяют при диаметрах от 500 мм до 3...4 м. Сборные железобетонные трубы со стальным сердечником допускают внутреннее давление до 3 МПа, монолитные — до 0,5 МПа. Асбестоцементные трубопроводы делают диаметром до 500 мм, иногда — до 1000 мм на давления не выше 1,2 МПа. Стальные трубы используют при высоких давлениях и когда использование железобетонных или асбестоцементных экономически нецелесообразно либо технически невозможно: при укладке под воду, на слабых просадочных основаниях и т. д.

Стыки сборных железобетонных труб выполняют раструбного типа, трубы стальные или со стальным сердечником соединяют сваркой, покрывая место стыка цементным раствором. В железобетонных трубопроводах большого сечения, как сборных, так и монолитных, в швах секций устраивают резиновые, металлические или битумные шпонки. Асбестоцементные трубы соединяют муфтами из того же материала или чугунными с резиновыми уплотняющими кольцами.

Короткие трубопроводы большого диаметра прокладывают открыто, на массивных опорах, с уклонами, обеспечивающими их устойчивость против сдвига.

Длинные напорные трубопроводы укладывают чаще всего в траншеях под землей, ниже глубины промерзания, с учетом обеспечения их прочности при наезде на траншею тяжелых транспортных средств.

На объектах повышенной надежности трубопроводы укладывают в галереях, что облегчает ремонт и обслуживание сооружения.

При подземной прокладке стальных трубопроводов для защиты от коррозии трубы покрывают гидроизолирующим слоем на битумной основе, а на трубопроводах повышенной ответственности в дополнение применяют катодную защиту.

Выделяющийся из воды воздух, скапливаясь в местах вертикальных перегибов трубопровода, снижает его пропускную способность, поэтому в точках перегиба устанавливают вантузы для выпуска воздуха. Там же монтируют и устройства для впуска воздуха, чтобы избежать опасных вакуумов при сбросе воды. В наземных трубопроводах в точках с наименьшими отметками устраивают водоспускные отверстия, снабженные задвижками. Не реже чем через каждые 3...5 км на трубопроводах устанавливают смотровые колодцы и задвижки, позволяющие отключить поврежденный участок для ремонта, а на подземных — и люки для откачки воды.

На трубопроводах со сварными стыками при прокладке в галереях, и тем более открытой, устраивают компенсаторы,

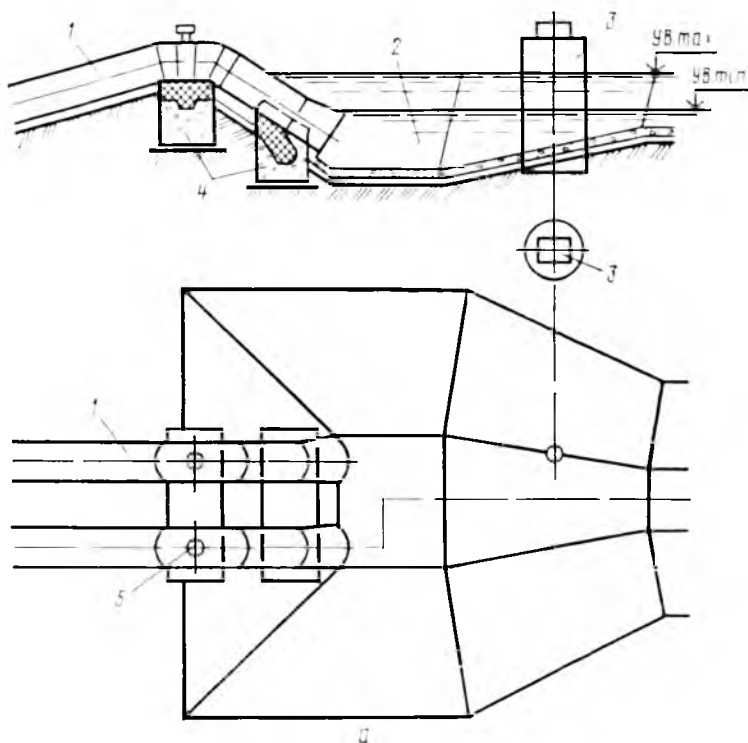
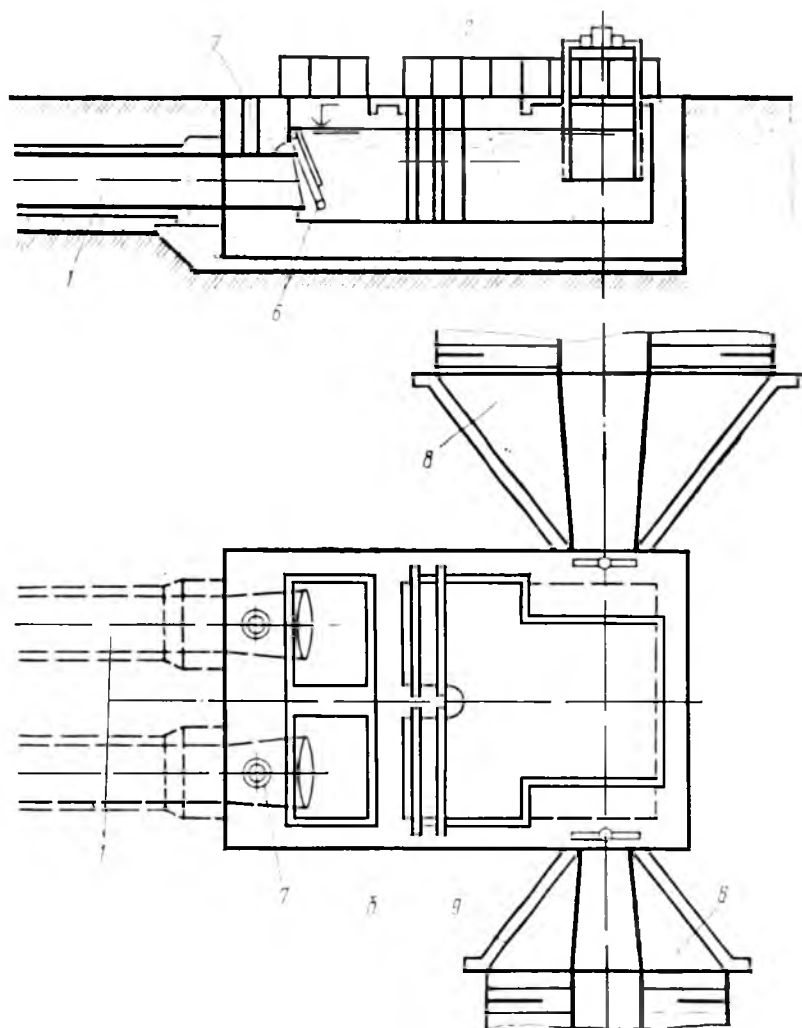


Рис. 9.20. Водовыпускные сооружения:

а — сифонного типа; б — с затвором-клапаном; 1 — трубопроводы; 2 — колодец; 3 — успокоительная шахта для измерения уровней; 4 — опоры; 5 — клапан срыва вакуума; 6 — клапан; 7 — труба для подачи воздуха; 8 — крепление участка сопряжения с каналом; 9 — бетонная стенка

воспринимающие изменение длины труб при колебаниях температуры.

Для предотвращения обратного тока воды через проточный тракт насоса (что может вызвать повреждение электрооборудования) применяют обратные клапаны (см. поз. 1 рис. 9.8). При быстром закрытии клапана в водоводе возникает гидравлический удар, сопровождающийся резкими колебаниями давлений в трубах, для борьбы с которым устанавливают специальные гасители удара.



В крупных узлах с относительно короткими напорными водоводами и подачей в открытый водоприемник применяют *водовыпускные сооружения*, предотвращающие обратный ток воды при остановке насосов. Водовыпускное сооружение может быть откосной или коробчатой конструкции, выполненной по типу водобойного колодца (рис. 9.20), из которого вода поступает в один (схема *а*) или несколько (схема *б*) каналов.

При колебаниях уровня водоприемника до 5 м часто применяют водовыпускное сооружение сифонного типа (см. рис. 9.20, *в*) с отметкой порога горловины сифона, несколько превышающей расчетный максимальный уровень, и раструбом, заглубленным под минимальный уровень воды. Для предотвращения обратного тока в верхней части горловины сифона устанавливают клапан срыва вакуума 5, автоматически впускающий воздух при опасных понижениях давления в трубопроводе.

При значительных колебаниях уровней на водовыпускных сооружениях трубопроводов среднего диаметра (до 1200 мм) для недопущения обратного тока устанавливают автоматические затворы типа тарельчатых клапанов 6 (см. рис. 9.20, *б*), представляющие диск, шарнирно закрепленный в верхней точке выходного сечения трубопровода. Под действием прямого тока воды затвор поднимается, принимая положение, близкое к горизонтальному; с прекращением подачи под действием собственного веса и обратного движения воды затвор захлопывается, перекрывая выходное отверстие. Для предотвращения образования вакуума при резком закрытии за затвором устраивают трубу 7, сообщающую полость водовода с атмосферой.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Почему напор, развиваемый насосом, должен быть больше статического напора насосной установки?
2. Каковы основные характеристики насосов?
3. В чем состоят достоинства центробежного насоса двустороннего входа перед насосами консольными?
4. Какова идея центробежных насосов для создания больших напоров?
5. Перечислите основные элементы насосной установки. Каково назначение каждого из них?
6. Что такое рабочая точка насоса. Чем она определяется?
7. Как осуществляют регулирование подачи насосов?
8. В каких случаях применяют береговые и русловые компоновки гидроузлов машинного водоподъема?
9. Каковы условия применения машинного узла оросительных систем с прямым и боковым водозаборами?
10. Каковы основные группы сооружений гидроузла машинного водоподъема? Назовите назначение каждой из них.
11. В каких условиях применяют насосные станции незаглубленного, камерного и блочного типов?
12. Почему опасен обратный ток воды через проточный тракт насосной станции? Как можно его предотвратить?

Глава 10. СУДОПРОПУСКНЫЕ, ЛЕСОПРОПУСКНЫЕ, РЫБОПРОПУСКНЫЕ И РЫБОЗАЩИТНЫЕ СООРУЖЕНИЯ

10.1. СУДОПРОПУСКНЫЕ СООРУЖЕНИЯ

10.1.1. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ О ВОДНЫХ ПУТЯХ

Водные пути в ряде районов нашей страны — единственные транспортные магистрали. Для сплава леса значение водных путей огромно.

Для судоходства в нашей стране используют крупные мелиоративные каналы, например Каракумский, а судоходные — для орошения (Волго-Донской), водоснабжения (канал им. Москвы). При комплексном использовании рек и каналов они должны отвечать требованиям отраслей-участников водохозяйственного комплекса.

Внутренние водные пути различают: *естественные* (реки и озера) и *искусственные* (каналы, водохранилища, шлюзованные реки). Судоходные каналы бывают: *соединительные* (Волго-Дон, Волго-Балт и др.), *подходные* (тупиковые для подъезда к объектам) и *обходные* (канал в обход Ладожского озера). Для транспортных целей внутренние водные пути по своему значению делят на четыре категории.

Судовой ход — это непрерывный участок по длине реки (каналу), на котором глубина и ширина гарантированы для судоходства.

Каналы комплексного назначения, используемые для судоходства, бывают трапецеидального и полигонального поперечного сечения, их габариты определяются размерами судов или грузовых караванов с соответствующими допусками, зависящими от категории водного пути.

У судоходных каналов регламентируется также площадь поперечного сечения, скорость течения. Берега судоходных каналов крепят для защиты от волнобоя.

10.1.2. СУДОХОДНЫЕ ШЛЮЗЫ

Гидротехническое сооружение в речном плотинном гидроузле или на перепаде канала, обеспечивающее подъем судна, плота или каравана из НБ в ВБ или наоборот — спуск из ВБ в НБ, называют судоходным шлюзом. Схема судоходного однокамерного и одноступенчатого шлюза представлена на рисунке 10.1.

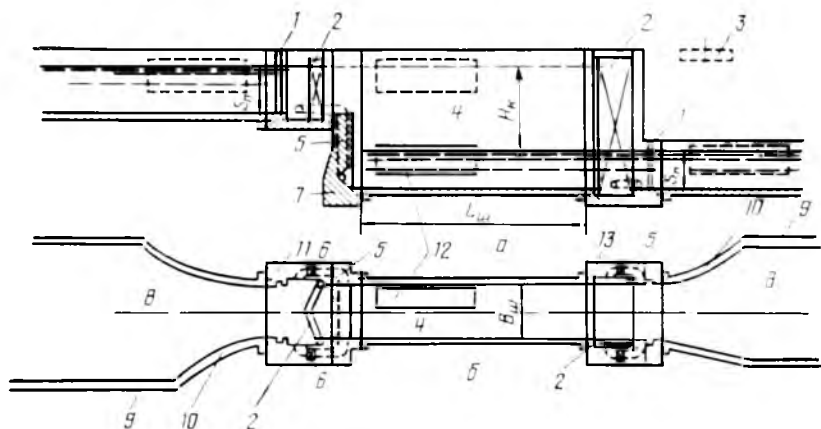


Рис. 10.1. Судовой однокамерный одноступенчатый шлюз:

а — продольный разрез; *б* — план; 1 — пазы ремонтных затворов; 2 — ворота; 3 — положение моста; 4 — камера; 5, 6 — водопроводная галерея и затвор на ней; 7 — стенка падения; 8 — подходные каналы; 9 — причальные стенки; 10 — направляющие палы; 11, 13 — верхняя и нижняя головы; 12 — шлюзующее судно

Основные элементы судового шлюза: подходные участки со стороны ВБ и НБ; верхняя и нижняя головы шлюза с воротами (или другими типами затворов), водоводами для заполнения и опорожнения, шлюзовая камера.

Головы шлюзов — подпорные сооружения, отделяющие камеры шлюзов от ВБ и НБ (или одну камеру от другой в многокамерных шлюзах); в головах располагают механическое оборудование — ворота, механизмы управления ими и водоводы.

Камера — это водная акватория, ограниченная головами и стенами, которая предназначена для осуществления процесса шлюзования судов (перемещения от уровня ВБ до уровня НБ и наоборот или от уровня одной камеры до смежной в многокамерных шлюзах).

Судовые шлюзы подразделяют по числу камер, расположенных последовательно, на *однокамерные*, *однокамерные с промежуточной головой* и *многокамерные*.

По числу камер, расположенных параллельно, судовые шлюзы делят на *однориточные* и *двухриточные*.

Размеры камеры шлюза принимают в зависимости от грузооборота по габаритам одного расчетного судна или каравана, устанавливаемого в одну или две колонны.

Параллельные нитки шлюзов строят на крупных гидроузлах при очень большом грузообороте. В зависимости от величины перепада между бьефами или напора гидроузла шлюзы строят

одноступенчатые (однокамерные) и многоступенчатые (многокамерные).

Камеры и системы питания судоходных шлюзов. Полезную длину (м) камеры вычисляют по зависимости

$$l_{c,ef} = \sum_{i=1}^n l_s + \sum_{i=1}^{n-1} \Delta l$$

где $\sum_{i=1}^n l_s$ — сумма длин расчетных судов, составов или плотов, устанавливаемых при шлюзовании в кильватер, м; n — число одновременно шлюзующихся судов; Δl — запас по длине на интервалы между судами и конструкциями шлюза, м, $\Delta l = 2 + 0,03 l_s$.

Ширину (м) камеры принимают не менее

$$b_{c,ef} = \sum_{i=1}^{n_1} b_s + \sum_{i=1}^{n_1+1} \Delta b_s$$

где $\sum_{i=1}^{n_1} b_s$ — сумма ширин одновременно шлюзующихся и рядом стоящих судов, составов; Δb_s — запас по ширине, принимают 0,1...0,5 м.

Глубина на пороге зависит от наименьшего расчетного судоходного уровня и составляет

$$h_l \geq 1,3S,$$

где S — максимальная осадка расчетного судна с грузом, м.

Полученные по приведенным зависимостям размеры округляют в сторону увеличения до регламентированных СНиП значений. В СССР размеры камер судоходных шлюзов $l_{c,ef} \times b_{c,ef} \times S$ принимают от $35 \times 6 \times 1$ до $290 \times 30 \times 5,5$ м.

Судоходная трасса при подходе к шлюзу должна иметь прямолинейный участок, в который входят *шлюз* с его головами, *причальные стенки*, *направляющие палы* (см. рис. 10.1).

Механическое оборудование, трубопроводы с задвижками располагают в головах шлюза. Ворота (или другого типа заграждения) служат затворами, воспринимающими давление воды между бьефами. Двустворчатые ворота, представленные на рисунке 10.1, состоят из двух створок, вращающихся вокруг вертикальной оси, расположенной в конце шкафной части головы. Открываются и закрываются ворота только при одинаковых уровнях перед воротами и за ними.

Наполнение и опорожнение камер может быть *головное* или *сосредоточенное* и *распределительное* (рис. 10.2).

Конструкция головы зависит как от конструкции затвора (или ворот), так и от системы питания. Это обычно неразрезные пространственные железобетонные сильноармированные

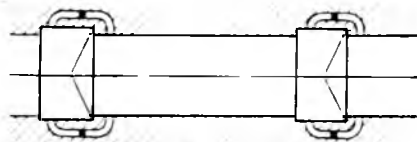


Рис. 10.2. Системы питания судоходных шлюзов:

а — головная; *б*, *в* — распределительная

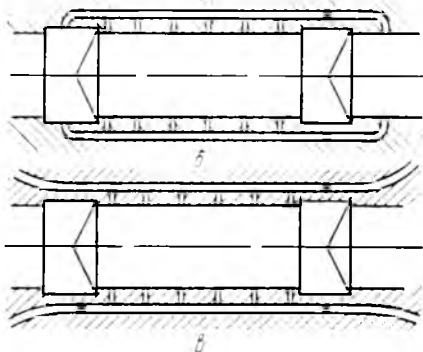
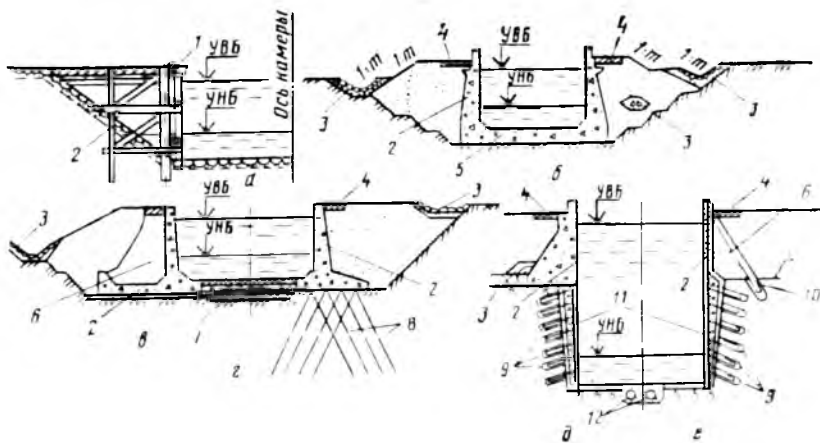


Рис. 10.3. Конструкции камер судоходных шлюзов:

а — с деревянной стенкой свайно-обшивочного типа и мошением по дну; *б* — железобетонная докового типа; *в*, *г* — отдельно стоящая стенка с контрфорсами и без них и со сваями в основании; *д*, *е* — в скальных основаниях; 1 — направляющая эстакада; 2 — стены камер; 3 — дренаж; 4 — приплюсовая площадка; 5, 7 — днище камер водонепроницаемое и водопроницаемое; 6 — контрфорс; 8 — сваи; 9 — анкеры; 10 — заанкеренная арматура; 11 — облицовка; 12 — водопроводные галереи



конструкции в виде плиты, жестко связанной с двумя устоями. В головах устанавливают два типа затворов: *основные* (ворота, сегментные затворы, плоские опускаемые или задвижные) и *ремонтные*.

При безгалерейном питании (обычно на верхней голове) используют сегментные или плоские затворы, открывающие отверстия, опускаясь в специальную нишу. На нижних головах применяют, как правило, двустворчатые ворота и реже — подъемно-опускаемые плоские затворы. Конструкция камеры зависит

от геологического строения основания и застенного пространства и в меньшей степени — от типа питания. Преимущественное распространение получили камеры из бетона или железобетона и реже — из металла и дерева (рис. 10.3).

Камеры шлюзов классифицируют по типам стен, днищ и обратных засыпок.

По типу стен камеры судоходных шлюзов (см. рис. 10.3) бывают *вертикальные* (иногда чуть наклоненные с уклоном 1:50 или 1:100) и *откосные* (наиболее распространенные), а по типу днищ — со сплошными *водонепроницаемыми* и *водопроницаемыми* днищами.

В камерах со сплошными водонепроницаемыми днищами стенки и днище представляют монолитную конструкцию (см. рис. 10.3, б), это надежная и совершенная конструкция во всех отношениях. Водонепроницаемые днища могут быть неразрезные и разрезные (с целью снижения нагрузок на них уменьшают их толщины).

Водопроницаемые днища с отдельно стоящими стенами применяют, когда водонепроницаемые дороже. Это обычно в гидротехнических сооружениях низкого напора или когда камера судоходного шлюза выдвинута в НБ. На слабых грунтах стены можно располагать на сваях (см. рис. 10.3, а, г).

По длине камер судоходных шлюзов на нескальных основаниях через 20...30 м устраивают деформационные швы, аналогично швам гравитационных плотин.

Конструкции камер судоходного шлюза в скальных породах приведены на рисунке 10.3, д, е.

Система питания судоходных шлюзов служит для наполнения и опорожнения шлюзовых камер с обеспечением допустимых скоростей движения воды в камере, а также в верхнем и нижнем подходах каналов.

Головную или сосредоточенную систему питания применяют при напорах не более 15 м — это водоводы в пределах верхней и нижней голов шлюза (см. рис. 10.2, а). Такая конструкция обеспечивает минимум затрат при строительстве, удобна в управлении, а также для осмотра и ремонта. Разновидность головной системы питания — подача воды в шлюзовую камеру из-под затвора, когда верхняя голова оснащена не двустворчатыми воротами, а подъемно-опускным плоским или сегментным затвором.

Распределительную систему питания применяют, когда произведение напора в камере шлюза H_k на ее полезную длину L_k составляет $H_k L_k > 2000 \text{ м}^2$ и отношение напора к глубине на выходном пороге $S_n H_k / S_n > 2$. Приведенные соотношения в реальных условиях часто справедливы для шлюзовых камер с напором от 15 м и выше. Для наполнения камеры воду пуска-

ют (см. рис. 10.2, б, в) через отверстия по всей длине камеры. Это позволяет уменьшить динамические воздействия на корпуса судов, находящихся в камере при ее наполнении. Опорожняется камера через эту же систему отверстий и сборных труб в ее стенах, то есть также рассредоточенно. С целью уменьшения влияния на скорости потока в верхнем и нижнем подходных каналах при движении воды во время наполнения или опорожнения камеры со значительными расходами предусматривают забор воды (или сброс ее в НБ) вне подходных путей (см. рис. 10.2, в).

Представляют интерес системы питания со сбережением воды, в которых вблизи шлюза предусматривают сберегательные бассейны, куда собирается вода при опорожнении из верхней части камеры.

10.1.3. ПРОПУСК КАРАВАНОВ ИЛИ ОТДЕЛЬНЫХ СУДОВ ЧЕРЕЗ ШЛЮЗ

Для прохода грузового каравана, плота или отдельного судна (пассажирского) через судоходный шлюз должен быть выполнен последовательно ряд операций: открытие ворот; вход судна в камеру шлюза и его швартовка к рыму; закрытие ворот; включение водопроводных галерей и заполнение (или опорожнение) камеры до уровня бьефа, куда следует караван; открытие ворот для выхода каравана или судна выход каравана. При двустороннем (встречном) шлюзовании сразу же на место вышедшего из камеры судна или состава вводятся другие, идущие навстречу. Затем операции в той же последовательности повторяются. Суточную пропускную способность шлюза определяют при условии непрерывной работы в течение 23 ч и полной загрузке камеры судами расчетного типа.

Время (мин), затрачиваемое на один цикл при одностороннем шлюзовании (только вверх или вниз),

$$t = t_1 + 4t_2 + 2t_3 + t_4,$$

где t_1 — время ввода и швартовки судна или состава, мин; t_2 — время открытия и закрытия ворот, мин, $t_2 = 2 \dots 2,5$ мин; t_3 — время наполнения или опорожнения камеры, мин; t_4 — время снятия швартовых и вывода судна или состава, мин.

При двустороннем (встречном) шлюзовании время цикла, проходящегося на один караван (судно),

$$t' = t_1 + 2t_2 + t_3 + t_4.$$

При смешанной (то односторонней, то двусторонней) работе судоходного шлюза вычисляют среднее время шлюзования одного расчетного каравана (судна, плота).

Условия работы конструкций шлюзов: подпорных стен, ворот при многократном опорожнении и наполнении камер очень сложные.

Годовой грузооборот вычисляют по количеству дней навигации, суточной грузопропускной способности с учетом других факторов, а также расхода воды на шлюзование.

10.1.4. СУДОПОДЪЕМНИКИ

Судоподъемник — судопропускное сооружение, в котором сосредоточенные перепады уровней между бьежами преодолеваются судами посредством перевозки их на плаву в наполненной водой камере или насухо в специальных тележках. Опыт перевозки судов насухо небольшой вследствие конструктивных трудностей при решении способов опирания судов различных типов и конструкций на элементы судовозной тележки.

Все судоподъемники разделяют на *вертикальные* и *наклонные*. В вертикальных судоподъемниках, схемы которых представлены на рисунке 10.4, вес судовозной камеры, воды и судна уравнивается одним из трех способов: жесткими противовесами, давлением воды в закрытых (поршневых) камерах, поплавками. Для транспортирования судовозной камеры с водой и судна используют давление воды с ВБ или механические приводы.

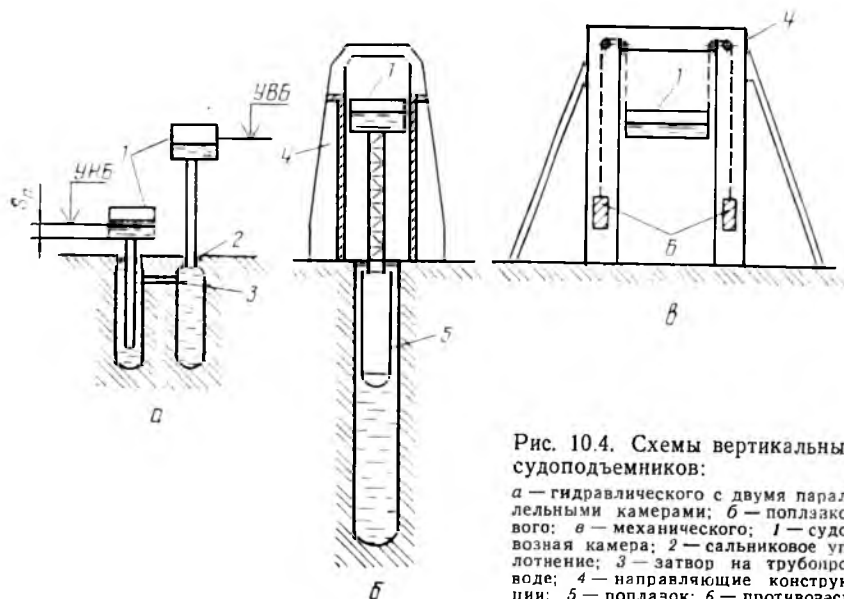


Рис. 10.4. Схемы вертикальных судоподъемников:

а — гидравлического с двумя параллельными камерами; б — поплазкового; в — механического; 1 — судовозная камера; 2 — сальниковое уплотнение; 3 — затвор на трубопроводе; 4 — направляющие конструкции; 5 — поплавок; 6 — противовесы

Наклонные судоподъемники трассируют либо по низовому откосу плотины, либо по пологому береговому склону речной долины. Заложение откоса, по которому располагают судовозные пути, должно быть не круче 1:7 или 1:10. По специально уложенным путям перемещается судовозная тележка, на которой установлена судовозная камера. Подвижные элементы судоподъемника (тележки, камеры) имеют огромную массу, и для их перемещения необходимы большие усилия, поэтому подвижные элементы делают парными либо применяют противовесы. Судовозная камера перемещается из НБ в ВБ и обратно с помощью приводного механизма. Камера заполняется водой из ВБ после остановки подвижных устройств и перекрытия в нее въезда, и судно выходит из судовозной камеры в эту камеру и из нее в водохранилище и далее вверх по реке. Если колебания уровня водохранилища значительны и могут достигать десятков метров, то используют схему с поворотной конструкцией. Судовозная камера, поднятая на гребень плотины вместе с тележкой, поворачивается на поворотном круге на 180° и далее по судовозным путям, уложенным по верховому откосу, опускается до совмещения уровней ВБ и судовозной камеры. Судно из камеры выплывает вперед кормой, затем разворачивается и движется далее.

Имеется конструкция бескамерного водоклинового судоподъемника. Это наклонный лоток, сопрягающий ВБ и НБ гидроузла, его дно на концевых участках расположено ниже соответствующих расчетных уровней в бьефах на глубину не менее судоходной. В верхней голове устроены ворота, предотвращающие излив воды по лотку. Подвижное устройство с катковыми уплотнениями по внутренней поверхности лотка сделано вместо нижней головы. Благодаря этому устройству в лотке поддерживается клин воды, на котором на плаву располагается транспортируемое судно. С перемещением вверх по лотку подвижного устройства перемещается и водный клин с судном. Когда происходит выравнивание уровней водного клина и ВБ, открываются ворота, и судно входит в ВБ.

Имеются конструкции наклонных судоподъемников, у которых на концевых участках и в ВБ и НБ построены шлюзовые камеры, оснащенные на входе и выходе двустворчатыми воротами; в этом случае обеспечивается их надежная работа при значительных колебаниях уровней ВБ и НБ.

10.2. ЛЕСОПРОПУСКНЫЕ СООРУЖЕНИЯ

Сооружения для транспортирования леса вниз по реке возводят в составе гидроузлов на лесосплавных реках. В зависимости от объема пропускаемой через гидроузел древесины,

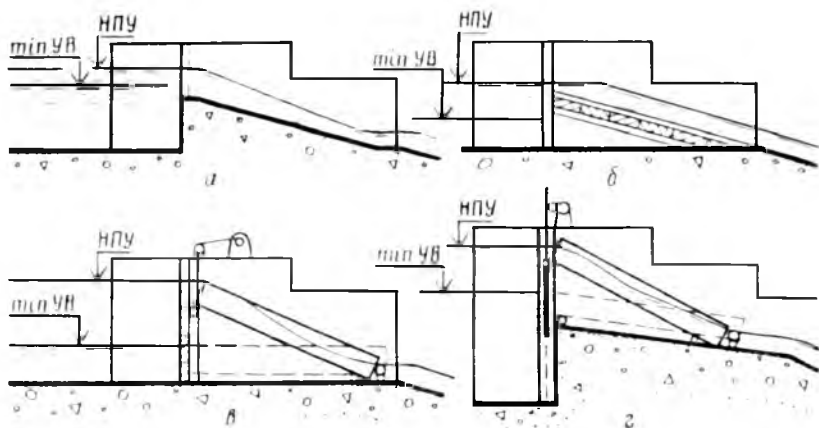


Рис. 10.5. Схемы головных частей бревноспусков:

а — с постоянной отметкой порога; *б* — с шандорным дном; *в* — с перемещающейся головной опорой по пазам; *г* — лоток, шарнирно связанный с опускаемым плоским затвором

технологии ее сплава (россыпью — молевой сплав или плотами), колебаний уровней ВБ и возможности обеспечения глубин НБ применяют различные типы лесопропускных сооружений: бревноспуски, плотоходы, механические плототаски, шлюзы-плотоходы, плотошлюзы, бревнопогружатели и механическая перевалка леса через гидроузлы.

Бревноспуски. Они служат для пропуска одиночных бревен, то есть при молевом сплаве. Поперечное сечение бревноспусков может быть прямоугольное, трапецеидальное, треугольное. Главные части бревноспусков могут быть нескольких типов: с постоянной отметкой порога, используют при небольших (0,5... 0,8 м) колебаниях ВБ (рис. 10.5, *а*);

с наклонным разборным дном, применяют при колебаниях уровня ВБ до 1,5 м. По мере понижения уровня постепенно вынимают брусья и этим обеспечивают постоянную глубину в лотке;

с перемещением головной опоры лотка в вертикальных пазах с помощью лебедок и скольжением нижней опоры по флутбету. Применяют при колебаниях уровня до 2,5 м и необходимости пропуска большого объема леса (см. рис. 10.5, *в*);

лоток шарнирно связан с опускаемым плоским затвором; используют при колебаниях уровня до 2,5 м и для пропуска однорядных плотов (см. рис. 10.5, *г*).

Ширина прямоугольного бревноспуска зависит от среднего диаметра бревен d и числа одновременно спускаемых бревен $n : b = nd + c$, где c — боковой запас, принимают $c = 0,1 \dots 0,15$ м.

Гидравлический расчет лотков аналогичен расчету для быстроток. Сплавнопропускную способность бревноспуска Q (в $\text{м}^3/\text{ч}$ древесины) вычисляют по формуле

$$Q = 3600 \mu A n v,$$

где μ — коэффициент продольного заполнения бревнами в зависимости от их числа n , $\mu = 0,2 \dots 0,7$; A — площадь поперечного сечения бревен; v — скорость течения воды в месте впуска бревен в лоток или скорость подачи бревен, $\text{м}/\text{с}$.

Для экономии воды устраивают *полусплавные* и *мокрые* лотки. В полусплавных лотках глубина воды составляет $0,2 \dots 0,3$ м и бревна движутся в полувзвешенном состоянии. В мокрых лотках глубина (слой воды) составляет $0,5 \dots 1,5$ см, это практически смазка, по которой бревна движутся под действием силы тяжести.

Плотоходы. Их применяют для плотового сплава. Это сооружения с широкими лотками (рис. 10.6). Различают плотоходы с широким лотком по типу бревноспуска (см. рис. 10.6, а) и со шлюзовой камерой и лотком (рис. 10.6, в).

В механических плотоспусках пучки или секции плотов переправляются из ВВ в НБ на плаву в камере, которая расположена на косяковой тележке.

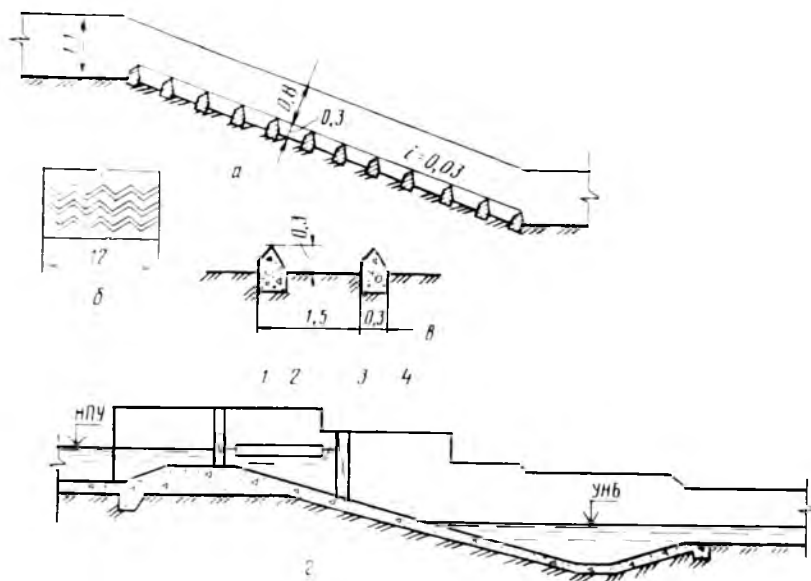


Рис. 10.6. Схемы плотоходов:

а, б, в — с усиленной шероховатостью; г — со шлюзовой камерой; 1 — головные ворота; 2 — плот; 3 — шлюзовая камера; 4 — низовые ворота

Судоходные шлюзы используют также для транспортировки буксируемых плотов (подобно судоподъемнику).

Затраты воды из ВБ на пропуск судов и леса через шлюзовые камеры и другие сооружения определяют по справочникам.

10.3. РЫБОХОЗЯЙСТВЕННЫЕ ГИДРОТЕХНИЧЕСКИЕ СООРУЖЕНИЯ

10.3.1. ВЛИЯНИЕ ГИДРОТЕХНИЧЕСКОГО СТРОИТЕЛЬСТВА НА ЗАПАСЫ РЫБЫ

Все реки нашей страны и моря, в которые они впадают, составляют единую экологическую систему ихтиофауны. Живущую в реках рыбу делят на три типа: проходные, полупроходные и туводные.

Проходные рыбы (осетр, белуга, севрюга, нельма, лососевые и др.) идут на нерест из моря вверх по реке на сотни и тысячи километров, где имеются необходимые условия для инкубации икры, роста личинок и мальков, а *полупроходные* (судак, сазан, лещ, вобла, тарань, рыбец и др.) размножаются в дельтах крупных и малых рек, залитых в половодье лугах и поймах. *Туводные* рыбы не мигрируют на нерест и постоянно живут в реках.

К элементам режима, обеспечивающим нормальные условия размножения, относят глубины и скорости течения потока, температуру воды, газовый режим, состояние дна (гравелисто-дресвяное дно для проходных рыб, трава на пойме — для полупроходных), наличие планктона, водорослей, мальков (для хищных рыб), наносный режим, прозрачность и качество воды (отсутствие всех видов загрязнений). Благоприятное сочетание всех условий обеспечивает воспроизводство рыбного стада.

При хозяйственном освоении рек эти условия обычно нарушают. Происходит перекрытие путей миграции (гидроузлами — по пути производителей вверх по реке на нерест, водохранилищами — при возвращении молоди вниз по течению), изменение режима нерестилищ (в водохранилище пойма затоплена, в НБ не заливается), травмирование рыбы различными конструкциями и скоростными судами, захват молоди в водозаборные сооружения и др. Меры, которые принимают для сокращения ущерба гидростроительством на реках, и компенсация его сводятся к строительству рыбообразовных хозяйств и заводов, мелиорации нерестилищ, устройству рыбопропускных сооружений в составе гидроузлов, оборудованию водозаборных сооружений рыбозащитными конструкциями, строительству рыбоводных путей. Рыбохозяйственные сооружения подразделяют на:

рыбопропускные сооружения гидроузлов, рыбозащитные сооружения и конструкции, гидросооружения рыбоводных прудов, искусственные нерестилища.

10.3.2. РЫБОПРОПУСКНЫЕ СООРУЖЕНИЯ

Рыбоходы. Это сооружения (лотки, каналы) с постоянно действующим потоком воды при скоростях течения, обеспечивающих самостоятельный проход рыбы из НБ в ВБ гидроузла. Существуют три основных типа рыбоходов: лотковые, лестничные, прудковые. Рыбоходы применяют при перепадах уровней не более 30 м. Скорости в рыбоходах не должны превышать некоторую величину, которую может преодолеть рыба. Для разных видов рыбы эти скорости различны и составляют от 2,3...3,5 для лососевых, форели, жерева до 0,6...1,2 м/с для сазана, леща, окуня, линя, плотвы. В зависимости от создаваемых скоростей течения рыбоходы делят на три группы: с одинаковой средней скоростью течения на протяжении всего сооружения — лотковые сооружения и обходные каналы; с разными скоростями на различных участках — прудковые и лестничные рыбоходы; угреходы.

Рыбоходы при средних уклонах 0,05...0,2 и достаточно высоких напорах получают длинными, поэтому их делят на участки, между которыми предусматривают зоны отдыха с малыми скоростями воды.

Лотковый рыбоход представлен на рисунке 10.7. В нем через 7...10 перегородок необходимо делать горизонтальный участок для отдыха. Лотковые рыбоходы, удовлетворительно проявившие себя в работе, имеют следующие параметры: напор 2...27 м, ширину лотка 1,6...3,5 м, глубину воды в лотке 0,4...1,5 м, ширину прохода для рыбы 0,35...0,6 м, уклон лотка 0,077...0,143, расход потока 0,1...0,65 м³/с, скорость в проходной части 0,8...2,5 м/с.

Лестничный рыбоход — ступенчатый лоток (рис. 10.8).

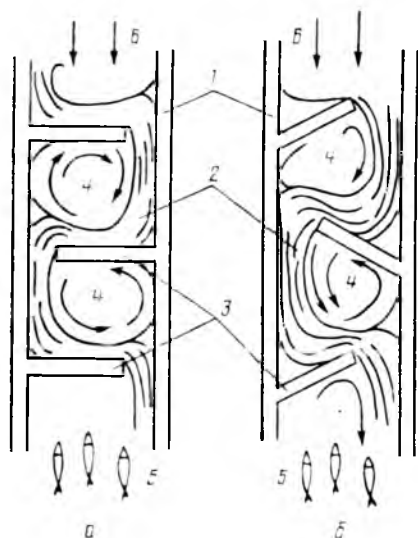


Рис. 10.7. Фрагмент лоткового рыбохода в плане:

а — с перегородками, перпендикулярными продольным стенкам; б — с косорасположенными; 1 — стенка наклонного лотка; 2 — зона транзитной струи; 3 — поперечные стенки; 4 — водоворотная зона; 5 — направление движения рыбы; 6 — направление течения

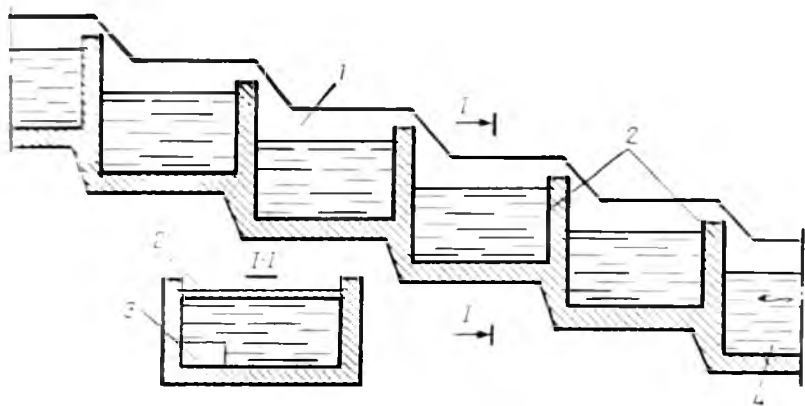


Рис. 10.8. Фрагмент лестничного рыбохода:

1 — продольные стенки; 2 — поперечные перегородки; 3 — впаивные отверстия; 4 — направление хода рыбы

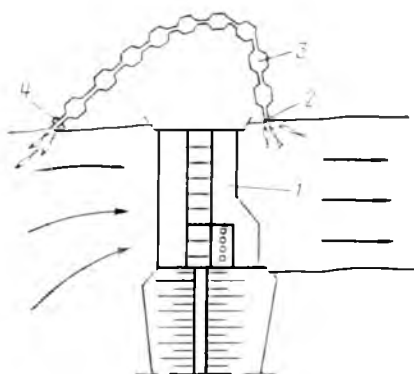


Рис. 10.9. Прудовый рыбоход на гидроузле:

1 — гидроузел; 2 — вход в рыбоход (устье); 3 — прудок; 4 — выходной оголовок

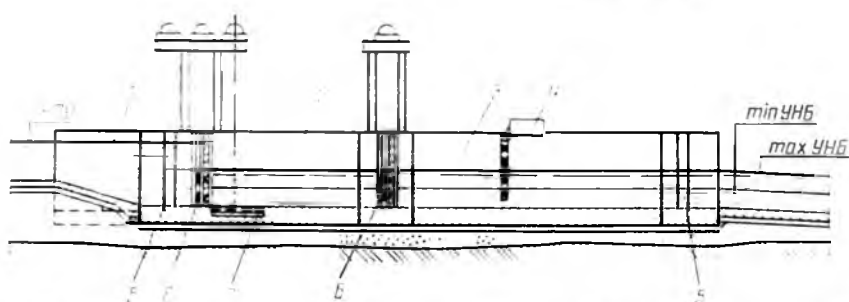


Рис. 10.10. Рыбопропускной шлюз (гидравлический рыбоподъемник с горизонтальной камерой):

1 — выходной верховой лоток; 2 — рабочая камера; 3 — рыбоподъемник; 4 — побудительное устройство; 5 — паз ремонтного заграждения; 6 — рабочий затвор; 7 — ихтиологическая площадка

Это система бассейнов шириной 1,2...3,5 м, длиной 2...2,5 м, глубиной воды 1,2...1,75 м; с перепадом уровней между соседними бассейнами от 0,15...0,25 (для судака, рыбака, сельди и др.) до 0,3...0,5 м (для осетровых и лососевых). В поперечных перегородках между бассейнами устраивают вливные отверстия поочередно с левой и правой сторон (у дна — для осетровых, у поверхности — для сельди), размерами от $0,2 \times 0,3$ до $1 \times 1,5$ м.

Прудковые рыбоходы применяют при соответствующих топографических и геологических условиях (рис. 10.9). Прудки имеют большие размеры, чем отдельные секции лотковых и лестничных рыбоходов: ширина 3, длина 5, глубина 1,5 м. Падение уровня в соединительных каналах зависит от вида рыбы и составляет 0,4...1,66 м. На построенных прудковых рыбоходах напор гидроузла составляет 3...22 м, глубина потока в соединительных каналах 0,6...0,75 м.

Рыбоходные шлюзы. Это сооружения цикличного действия в отличие от рыбоходов. Их относят к гидравлическим рыбоподъемникам с горизонтальной камерой. Работа рыбоходных шлюзов характеризуется тем, что преодоление напора в них не связано с затратой собственной энергии рыб-мигрантов. Другая особенность их работы — возможность контроля за движением рыбы на всем протяжении сооружения от момента ее входа в рыбонакопитель до выхода в водохранилище. Конструкция рыбопропускного шлюза представлена на рисунке 10.10. Рыба заходит в рыбонакопитель под воздействием привлекающих скоростей, затем с помощью побудительного устройства она направляется в рабочую камеру, потом происходит выравнивание уровня в рабочей камере с уровнем ВБ, открывается рабочий затвор, и с помощью поднимающейся ихтиологической площадки рыба поднимается вверх и идет в ВБ. Получается как бы процесс шлюзования. Такие шлюзы возводят в гидроузлах при напоре 15...20 м.

Гидравлические рыбоподъемники с вертикальной шахтой. Их применяют в гидроузлах с напором более 20 м. Принцип их работы аналогичен рыбопропускному шлюзу. Имеются низовой лоток, куда входит рыба, побудительное устройство в виде решетки, направляющее рыбу к заходу в рабочую камеру (рыбоподъемную шахту), в которой имеется также побудительная решетка, расположенная горизонтально, перемещающаяся вверх и направляющая рыбу к отверстию ВБ и далее в водохранилище.

Гидравлический рыбоподъемник с наклонной камерой. Он относится к сооружениям напорного типа, рыба движется по трубе, в которой все сечение потока заполнено движущейся водой. Сооружение строят в теле бетонной гравитационной

плотины. В этом случае рыба преодолевает сопротивление потока, движущегося по наклонной камере со значительными скоростями.

Другие способы пропуска рыбы из НБ гидроузла в ВБ приведены ниже.

Плавучая рыбопропускная установка, состоящая из рыбозаградителя, перекрывающего сечение реки в НБ; судна-рыбонакопителя, куда привлекается рыба; самоходного контейнера, принимающего рыбу из судна-накопителя и транспортирующего рыбу в ВБ. Опыт эксплуатации таких устройств показал их надежную работу при наличии рыбозаградителя в НБ высокой стоимости.

Использование *судоходных шлюзов* для пропуска рыбы в ВБ из НБ. Это мероприятие высокоэффективно, если в период между шлюзованием для рыбы создан транзитный ток воды в НБ, установлены рыбозаградители в соответствующих местах и система работает для пропуска рыбы и в ночное время.

10.3.3. РЫБОЗАЩИТНЫЕ СООРУЖЕНИЯ

Необходимость их возведения возникает для предотвращения попадания в водозаборные сооружения гидроузлов мальков и взрослых рыб, скатывающихся из ВБ в НБ, в опасные зоны гидроэлектростанции и плотины, а также для направления рыбы к входу в рыбопропускные сооружения. Для разработки рыбозащитных сооружений используются данные о биологии и распределении рыбы на разных стадиях развития, о поведении рыб при попадании в зону действия водозабора, о физических явлениях, действующих на рыб в зоне водозабора. При проектировании рыбозащитных сооружений необходимо обеспечить комплексное воздействие на различные органы чувств рыб.

По принципу действия все рыбозащитные сооружения делят на три группы: механические, гидравлические и физиологические.

Механические рыбозащитные сооружения. Они получили широкое распространение как в СССР, так и в других странах, как наиболее эффективные. Это механическая преграда, защищающая водозаборное сооружение от попадания в него рыбы. Бывают фильтрующие и сетчатые рыбозаградители. По способу отвода рыбы они могут быть с рыбоотводом и без рыбоотвода. Известны несколько разновидностей механических рыбозаградителей: фильтры, сетчатые с плоской сеткой, перемещающиеся ленточные сетки.

Фильтры — простейшие в эксплуатации сооружения, это укрепленные наброски из хвороста и камней; фильтрующие дам-

бы из камня. Созданы кассетные, ряжевые и другие насыпные фильтрующие сооружения, сооружения из порézаста.

Фильтры эффективны, если скорости течения воды в 3 раза превышают скорость на подходе к сооружению.

Сетчатые сооружения (рис. 10.11) преграждают путь движущейся рыбе. Для обеспечения заданной скорости потока сетку постоянно очищают или гидравлическим способом без подъема ее из воды, или вращая сетчатый барабан. Сетки применяют в виде плоских преград (для защиты от рыб длиной 30 мм и более) в виде сетчатых конусов (см. рис. 10.11, в), перемещающейся в воде ленточной сетки конвейерного типа. Ленточные сетки могут вращаться вокруг горизонтальной или вертикальной плоскости, это очень удобные недорогие сооружения.

Гидравлические рыбозащитные сооружения. Это устройства, которые создают перед водозаборными сооружениями гидравлические условия, препятствующие попаданию рыбы в водозабор и направляющие ее в рыбоотвод. К этому типу относятся рыбозащитные сооружения *заглубленного типа* и *жалюзийные*. Первое из них представляет собою оголовок, заглубленный под уровень на 7...8 м, снабженный сверху козырьком; воду в сооружение забирают через боковые окна, оснащенные грубой решеткой.

Жалюзийный рыбозаградитель — конструкция, которая для приближающейся к ней рыбы создает видимость заграждения в виде сплошной стенки. Здесь очень важно обеспечение соответствующих подходных скоростей, при которых рыба не травмировалась бы, натываясь на них.

Физиологические рыбозащитные сооружения. В них используют реакцию рыб на различные раздражители, вызывающие испуг или привлечение их (зрение, слух, органы боковой линии, осязание). Применяют или отдельные раздражители, или комплекс их. Эти сооружения не допускают рыбы в водозабор и в то же время не препятствуют движению воды. К сооружениям данного типа относятся электрические, по которым имеются законченные конструктивные решения, и световые, звуковые, воздушно-пузырьковые, находящиеся в стадии изучения.

Недостатки этих сооружений: сложность в эксплуатации и высокая стоимость.

Рыбоотводы. Их делают самотечного типа или с принудительным отведением рыбы. Самотечные рыбоотводы используют при благоприятных гидравлических условиях, что встречается не так уж часто. Принудительный отвод рыбы осуществляют с помощью эжекторов или водоструйных насосов. В этой конструкции поток воды с рыбой проходит в рабочую камеру через сопло, где рыба не соприкасается со стенками насоса, так как вдоль стенок подается вода. Несмотря на это, травмирован-

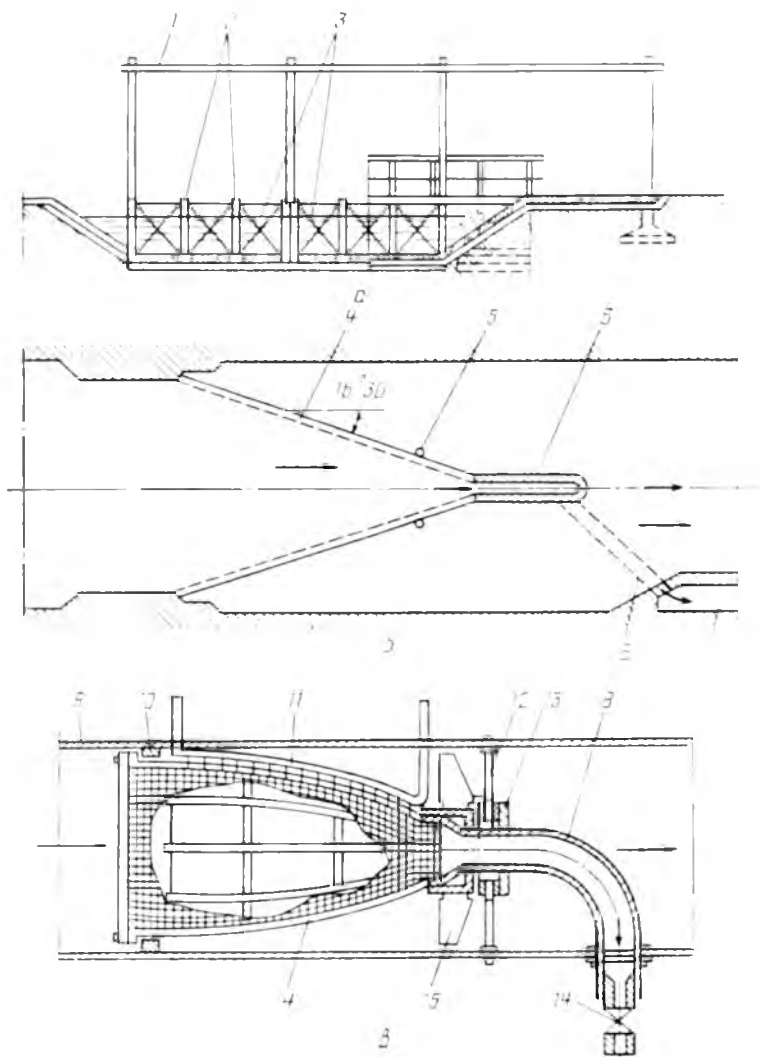


Рис. 10.11. Механические рыбозащитные сооружения:

a — кассетные фильтры; *б* — плоская сетка; *в* — сетчатый конус; *1* — мнорельс; *2* — затакада; *3* — сетчатые кассеты; *4* — сетка; *5* — флейта; *6* — рыбо-накопитель; *7* — сбросной лоток; *8* — рыбоотвод; *9* — трубопровод; *10* — опорное кольцо; *11* — водоструйная флейта; *12* — спицы для крепления подшипника; *13* — подшипник; *14* — вентиль; *15* — крыльчатка

ность рыбы очень высока, что объясняется высокой турбулизацией потока в рабочей камере эжектора и большим перепадом давлений на подходе к смесительной камере.

Центробежные насосы. Их также применяют для отведения рыбы из зоны перед рыбозаградителем. Считают перспективными горизонтальные центробежные насосы капсульного типа из-за невысокой их стоимости (здесь обходятся без здания насосной станции), простоты установки и эксплуатации, а также экономии веса (чугунное литье заменено алюминиевыми сплавами) и большой высоты подачи воды с рыбой.

Вакуумные устройства. Их используют для рыбоотвода. Вакуум-насос и компрессор создают в баке разрежение, открывается всасывающая линия, и вода вместе с рыбой заполняет бак. Затем всасывающая линия закрывается и переключается на другой пустой бак, а содержимое заполненного поступает в транспортную магистраль.

Предлагается использовать черпаки и черпаки с поддоном для отвода рыбы от ленточных сеток. Исследования на модели показали, что выживание молоди в этом случае составляет 75%.

10.3.4. РЫБОВОДНЫЕ ПРУДЫ

Прудовые товарные хозяйства часто предусматривают в комплексе с оросительными системами, проектируют их и как самостоятельные хозяйственные объекты.

Типы прудовых хозяйств зависят от их назначения и разделяются на полносистемные, рыбопитомники и нагульные. В прудах в основном выращивают карпа, иногда дополнительно и других растительноядных, пелядь, щуку.

Полносистемное прудовое рыбоводное хозяйство — комплекс прудов, в которых происходят нерест, выращивание молоди и нагул рыбы до товарных размеров. В такое хозяйство могут входить:

головной пруд для накопления воды и обеспечения ею других прудов, кроме того, он может быть использован как выростной. Располагают его на реке (в русле или на пойме) или делают наливным;

нерестовые (икрометные) пруды для нереста и инкубации личинок и выращивания малька до возраста 6...8 сут. Размещают их вдали от шумных производств и дорог на незаболоченных участках, покрытых луговой растительностью, недалеко от выростных прудов. Площадь их составляет 0,1...0,3 га, глубина 0,4...0,5 м и 1 м — у водоспуска;

мальковые пруды (площадь 0,2...1 га), которые служат для выращивания мальков до возраста 30...45 сут, их глубина

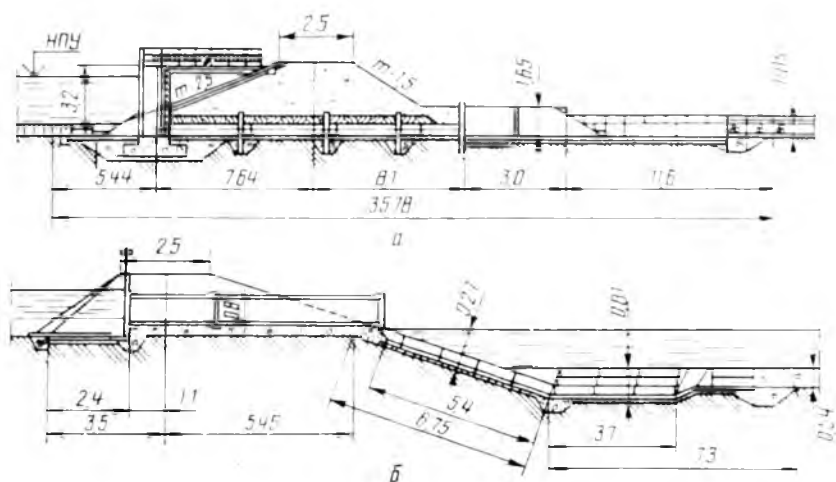


Рис. 10.12. Гидротехнические сооружения прудовых рыбоводных хозяйств: а — донный водоспуск на напор 2,5 м; б — водовыпуск трубчатый на расход до 0,9 м³/с (размеры в м)

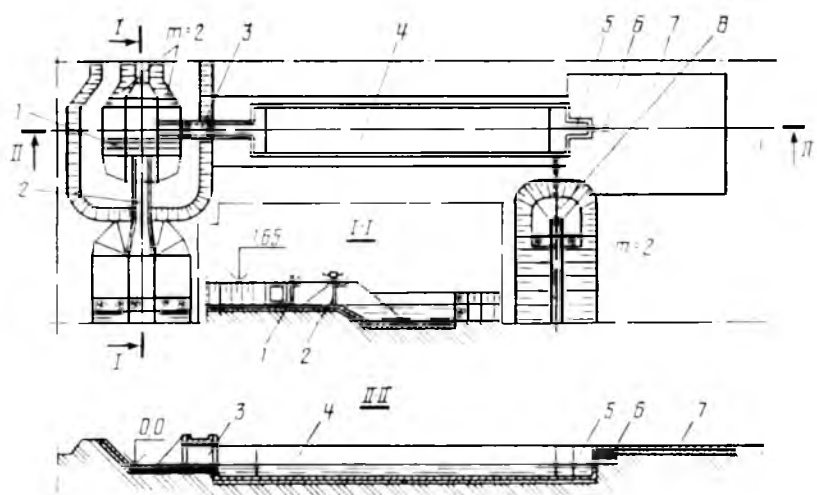


Рис. 10.13. Рыбоуловитель прудового рыбоводного хозяйства: 1, 2 — рыбозадерживающее и перегородивающее сооружения; 3 — рыбовыпуск; 4, 5 — камеры рыбоуловителя и облова; 6 — патрубок; 7 — разгрузочная площадка; 8 — донный трубчатый водовыпуск

0,5...0,8 м с повышением до 1...1,2 м у водоспуска. Требования к местоположению такие же, как и у нерестовых прудов;

выростные пруды предназначены для подрастания молоди (сеголеток), их площадь 5...15 га, глубина 0,8...1,5 м. Их располагают возможно ближе к нерестовым и зимовальным прудам;

зимовальные пруды обеспечивают перезимовку рыбы (сеголеток, производителей, ремонтного молодняка). Их глубина 2...2,5 м, при непромерзающем слое 1...1,3 м, площадь 0,5...1 га;

маточные (летние и зимние) пруды служат для содержания маточного поголовья и выращивания ремонтного молодняка. Площадь зависит от мощности хозяйств (0,5...1 га), глубина 1,3...1,5 м для летних и 2...2,5 м — для зимних прудов;

карантинные пруды используют для временного содержания вновь поступающих, а также для изоляции заболевших рыб. Строят их вдали от других прудов; площадь каждого пруда 0,2...0,4 га, средняя глубина 1...1,3 м. Пруды должны иметь изолированные водосброс и водоснабжение;

нагульные пруды служат для выращивания товарной рыбы. Их можно размещать на пойме или в русле. Глубина 0,5...2 м, в среднем 1,3 м, площади зеркала составляют от 20...50 га в мелких хозяйствах до 100...200 га — в крупных.

В рыбопитомники входят пруды тех же категорий, что и в полносистемном хозяйстве, за исключением нагульных.

В состав нагульного хозяйства, наоборот, включают только нагульные пруды.

Рыбоводные расчеты позволяют определить число и площади прудов различного назначения. Воду в пруды подают или самотеком, или с помощью насосной станции.

Гидротехнические сооружения рыбоводных прудов представляют собою комплекс сооружений, включающий плотины, дамбы, водозаборные устройства, наводковые водосбросы, каналы (сбросные и осушительные), сооружения на каналах (водовыпуски, быстротоки, перепады, дюкеры, перегораживающие сооружения), донные водовыпуски, рыбоуловители, сетчатые заграждения и др.

Донный водоспуск из пруда и трубчатый водовыпуск представлены на рисунке 10.12, а на рисунке 10.13 дана конструкция рыбоуловителя.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ

1. Дайте основные понятия о водных путях.
2. Для чего возводят судоходные шлюзы, из каких частей они состоят и как проходит процесс шлюзования?

3. Расскажите об основных классификациях судоходных шлюзов и типов их водного питания.
4. Когда применяют судоподъемники и как они работают?
5. Каково назначение рыбопропускных и рыбозащитных сооружений? Их классификация.
6. Какие типы рыбоходов бывают и когда какие из них используют? Что такое рыбопропускной шлюз?
7. Расскажите об основных типах рыбозащитных устройств, принципе их работы.
8. Как осуществляют пропуск леса через гидроузлы? Назовите основные типы лесопропускных сооружений, указав особенности их конструкций.
9. Дайте понятие о рыбоводных прудах и сооружениях на них.

Глава 11. ВОДОХРАНИЛИЩА И ПОДПЕРТЫЕ БЬЕФЫ. КОМПОНОВКИ РЕЧНЫХ ГИДРОУЗЛОВ

Современные крупные гидроузлы имеют, как правило, комплексное назначение, удовлетворяя одновременно потребности нескольких отраслей водного хозяйства, поэтому в состав таких гидроузлов, кроме гидротехнических сооружений общего назначения, входят и соответствующие специальные. Схему взаимного расположения сооружений в узле называют *компоновкой гидроузла*, и она во многом определяет затраты на строительство и эксплуатацию, то есть эффективность возведения гидроузла.

При строительстве гидроузлов создают *водохранилище* — емкость, позволяющую регулировать как уровни воды в ВБ, так и ресурсы воды в водотоке ниже гидроузла, то есть осуществлять регулирование стока реки, либо *подпертый бьеф*. В последнем случае регулирование стока не требуется. Исключение составляют безнапорные гидроузлы, например бесплотинные водозаборы и портовые сооружения.

Водоохранилища и подпертые бьефы можно создавать как при низконапорных, так и при средненапорных гидроузлах. ВБ высоконапорного гидроузла ($H > 50$ м), как правило, является водохранилищем.

Изменение естественного режима водотока, связанное с созданием водохранилища, часто приводит к неблагоприятным последствиям, требуя разработки дополнительных мероприятий по компенсации наносимых ущербов. Затраты по крупным водохранилищам достигают 20...50% затрат по всему гидроузлу.

11.1. ВОДОХРАНИЛИЩА, ПОДПЕРТЫЕ БЬЕФЫ И НБ ГИДРОУЗЛОВ

11.1.1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О ВОДОХРАНИЛИЩАХ, ИХ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Создание крупных водохранилищ оказывает значительное влияние не только на развитие той или иной отрасли народного хозяйства, но и приводит к социально-демографическим изменениям в прилегающем регионе, влияет на его природно-климатические условия.

В нашей стране около $\frac{1}{4}$ площади водного зеркала пресноводных водоемов приходится на водохранилища. Наиболее крупные из них по площади: водохранилища Иркутского и Верхне-Свирского гидроузлов, представляющие собой подпертые озера Байкал и Онежское. Соизмеримы с ними и некоторые искусственные озера на равнинных реках — Куйбышевское (6448 км²), Волгоградское (3117 км²) и др. Длина равнинных водохранилищ достигает 450 км при ширине более 10 км; максимальные глубины могут составлять 30 ... 40 м, а в горных условиях — 200 ... 300 м. Запасы воды в наиболее крупных из них составляют, км³: в Братском — 169,3; Красноярском — 73,3; Куйбышевском — 58.

Указанные параметры (объем, площадь зеркала, длина, ширина и глубина) являются основными характеристиками водохранилища. Определяют их тремя характерными уровнями ВБ (рис. 11.1): уровнем мертвого объема (УМО), нормальным подпертым уровнем (НПУ) и форсированным подпертым уровнем (ФПУ). Объем воды, ограниченный сверху УМО, называют *мертвым объемом*, объем между УМО и НПУ — *полезным объемом* и между НПУ и ФПУ — *резервным объемом* водохранилища. Мертвый объем определяется предполагаемым объемом наносов, которые осядут в водохранилище за расчетное время его эксплуатации, либо заданной отметкой порога водозаборного сооружения.

Полезный объем водохранилища — это резерв воды, используемый на полезные нужды в маловодный период. Он позволяет также, аккумулируя часть паводка, уменьшить расход воды, подаваемой в НБ, что часто бывает необходимым для борьбы с наводнениями. Назначение отметки НПУ — сложная технико-экономическая задача. Наиболее просто она решается в случае одноцелевого гидроузла, например плотинного водозабора, где подпор определен заданной высотой командования магистрального канала (см. гл. 8).

Форсированный подпертый уровень — это тот уровень ВБ, при котором через гидроузел пропускают расчетный макси-

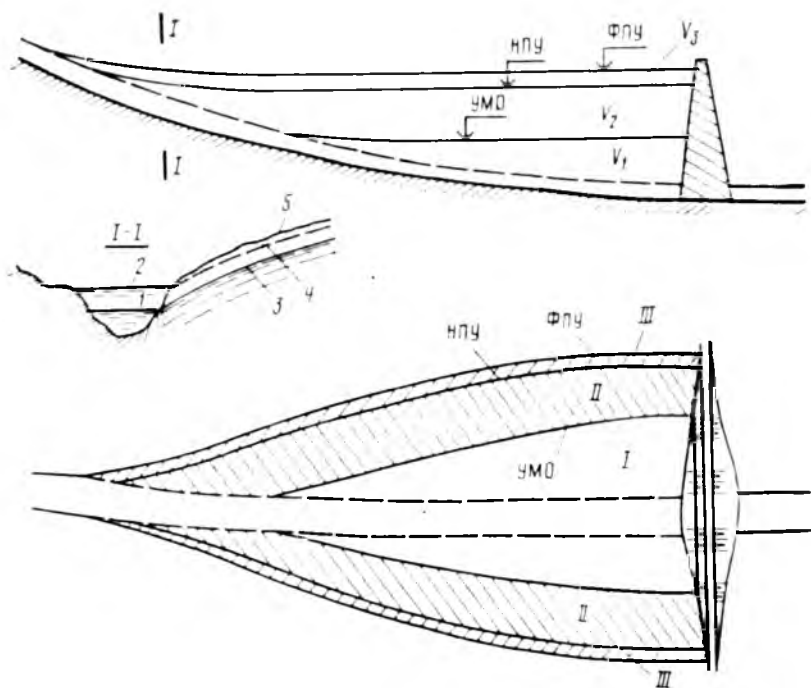


Рис. 11.1. Схема водохранилища:

V_1 ; V_2 ; V_3 — мертвый, полезный и резервный объемы; I , II , III — зоны затопления — постоянного, долговременного и кратковременного; 1 , 2 — бытовой и подпорный уровни воды в реке; 3 , 4 — кривая депрессии грунтовых вод в естественном и подпорном состояниях; 5 — подтопляемая территория

мальный расход воды. Его превышение над НПУ называют высотой форсировки. Она может колебаться от нескольких метров в гидроузлах с нерегулируемыми водосбросными сооружениями до нуля при водосбросах с затворами.

Назначение отметки ФПУ также является технико-экономической задачей: с ростом форсировки уменьшаются длина водосбросного фронта и стоимость водосброса, но возрастают высота плотины и площади затопляемых территорий, что увеличивает затраты. Оптимальной будет та высота форсировки, при которой суммарные затраты по объекту станут минимальными.

Важная характеристика водохранилища — отношение полезного объема к площади зеркала при НПУ, характеризующее эффективность использования отчуждаемой территории. Чем больше эта величина, тем лучше экономические показатели водохранилища.

Заметим, что, принимая решение о строительстве крупных объектов, нельзя ограничиваться только технико-экономическими показателями, следует учитывать и другие аспекты, не имеющие пока четкой экономической оценки (социально-психологические, культурные, экологические и др.). Так, переселение большой группы населения из зоны затопления не только требует денежных затрат, но может привести к значительной миграции людей, лишенных привычного жизненного уклада, к нехватке рабочих рук в регионе; уничтожение памятников архитектуры многовековой давности, наскальных росписей каменного века наносит неопределимый ущерб духовному развитию народа. Решение каждого из таких вопросов требует специального глубокого изучения.

11.1.2. ВЛИЯНИЕ ВОДОХРАНИЛИЩ И ПОДПЕРТЫХ БЬЕФОВ НА ГИДРОЛОГИЧЕСКИЙ РЕЖИМ ВОДОТОКА

Влияние водохранилища на гидрологический режим водотока наиболее отчетливо выражено в НБ гидроузла. Здесь существенно уменьшается неравномерность распределения расходов в многолетнем и годовом разрезе: менее выраженными становятся паводковые и меженные периоды, что снижает опасность наводнений и позволяет уменьшить последствия маловодья.

Такая трансформация гидрографа, однако, имеет и отрицательные стороны, приводя к изменениям руслоформирующих процессов, условий обитания рыбы, сложившегося порядка использования пойменных земель. Вместе с тем для гидрологического режима НБ крупных комплексных гидроузлов характерна значительная неравномерность расходов в разрезе суток, определяемая режимом работы ГЭС; это приводит к резким колебаниям уровней воды, вызывающим разрушение берегов, ухудшение условий нереста рыбы (периодически обсыхают нерестилища), затруднениям в движении речного транспорта и др.

Гидрологический режим ВБ характеризуется резким изменением уровней воды по сравнению с бытовыми условиями, что влечет за собой затопление значительных площадей, изменение распределения скоростей и соответственно режима движения наносов.

На территории, занимаемой водохранилищем, выделяют следующие зоны (см. рис. 11.1): *I* — зону постоянного затопления с отметками, меньшими отметки УМО; *II* — зону долговременного затопления — в пределах колебания уровней и *III* — зону между НПУ и ФПУ, затапливаемую только в периоды пропуска паводков.

Повышение уровня воды сопровождается изменением сложившегося ранее водного баланса: с увеличением площади водного зеркала возрастают потери воды на испарение; увеличиваются и фильтрационные потери, что вызывает подъем уровня грунтовых вод на значительной территории — *подтопление земель* (см. рис. 11.1). Подъем грунтовых вод вызывает обводнение оснований зданий и сооружений, сопровождающееся уменьшением их несущей способности, развитие оползней, затопление подвальных помещений, карьеров и т. д. Высокий уровень грунтовых вод приводит к отмиранию ценных древесных пород и замене их влаголюбивыми (ольхой, осиной, березой), заболачиванию пониженных мест с соответствующим изменением травостоя. Площади подтопления могут быть значительными: в пределах населенных пунктов это территории с отметками, превышающими отметку НПУ на 3...4 м, а на сельскохозяйственных угодьях — на 1...2 м. В условиях равнинных рек подтопление земель может распространяться на много десятков километров от водохранилища или подпертого бьефа, вызывая значительный ущерб.

11.1.3. РЕЖИМ ДВИЖЕНИЯ НАНОСОВ В ВБ И НБ ГИДРОУЗЛОВ

Изменение гидрологического режима водотока, естественно, сопровождается трансформацией режима движения наносов.

Рассмотрим этот процесс на примере плотинного водозабора на реке со значительным содержанием наносов. В начальный период эксплуатации вследствие уменьшения скоростей в подпертом бьефе по сравнению с естественными условиями донные наносы останавливаются в его начале, а взвешенные частицы, оказываясь в зоне малых скоростей, осаждаются, как в отстойнике, равномерно заиливая пространство перед плотиной. Попадая в НБ, поток, освобожденный от наносов и поэтому обладающий высокой транспортирующей способностью, интенсивно размывает дно реки. С увеличением объема отложившихся в ВБ наносов скорости потока повышаются, а кривая подпора распространяется вверх по руслу (рис. 11.2), увеличивая зоны затопления и подтопления.

С ростом скоростей уменьшается интенсивность осаждения взвешенных наносов, возрастает мутность потока, поступающего в русло, снижая интенсивность эрозионных процессов за плотиной. С течением времени подпертый бьеф полностью заносится наносами, и восстанавливается их транзитное движение на участке русла, прилегающем к водозабору. Если при этом наносы, осажденные в отстойниках гидроузла, сбрасываются в реку, то транспортирующая способность потока оказы-

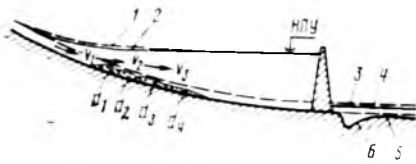


Рис. 11.2. Влияние аккумуляции наносов водохранилища на режим уровней в бьефах:

1, 4 — кривая подпора и уровень воды в ВБ после отложения наносов в НБ; 2, 3 — то же на начальном этапе эксплуатации водохранилища; 5 — первоначальная линия дна; 6 — линия дна, понизившаяся в результате размыва русла; v_1, v_2, v_3 — скорости потока; d_1, d_2, d_3, d_4 — диаметры отложившихся наносов, $v_1 > v_2 > v_3$

вается недостаточной, и НБ будет заноситься, что приведет к подъему уровней в реке. На водохранилищных узлах *заиление* (отложение мелких, взвешенных частиц) и *занесение* (отложение донных наносов) емкости водохранилища приводят не только к подъему уровней воды, но и иногда к уменьшению его регулирующей способности, что вызывает значительные эксплуатационные затруднения. Известны случаи, когда горные и предгорные водохранилища за 10...20 лет полностью заносились наносами. При достаточно крупных водохранилищах донные и большая часть взвешенных наносов остаются в ВБ в течение всего расчетного срока эксплуатации. В НБ таких гидроузлов развиваются эрозионные процессы, вызывающие постепенное понижение дна русла (см. рис. 11.2), сопровождающиеся падением уровней воды в реке и соответственно уровня грунтовых вод на прилегающей территории.

11.1.4. ПЕРЕРАБОТКА БЕРЕГОВ В ВБ И НБ

Создание подпора перед плотиной приводит к интенсификации процесса переработки берегов. Одна из причин этого — подъем уровня грунтовых вод в береговых склонах ВБ. Обводнение грунтов, особенно связных и мелкозернистых, ухудшает их сдвиговые характеристики и увеличивает фильтрационные силы, вследствие чего ранее устойчивые массивы приобретают склонность к обрушению. Особенно интенсивно обрушаются крутые борта на начальном этапе работы водохранилища, уменьшая полезный его объем и увеличивая площадь затопленной территории.

Устойчивость береговых склонов нарушается при быстрой сработке ВБ, когда формируется фильтрационный поток воды, насыщающий грунт берега, в сторону водохранилища. В НБ аналогичное явление может возникать при резком уменьшении расходов, подаваемых в реку, обычно на спаде длительного паводка.

В наибольшей степени переработка берегов подпертых бьефов, и особенно крупных водохранилищ, определяется действием волн. По мере приближения к берегу и уменьшения глубины воды форма волны меняется. Начиная с некоторой критической

глубины силы трения по твердой подводной поверхности оказываются настолько значительными, что происходит обрушение волны, а вдоль поверхности дна возникает течение со скоростями, направленными от берега. Волны, обрушиваясь на берег, оказывают на него значительные ударные воздействия, приводя к снижению сдвиговых характеристик грунтов, а придонные скорости, размывая их, относят продукты размыва. Последние оседают на дно водохранилища там, где придонные скорости меньше транспортирующих.

Процесс должен стабилизироваться, когда сформируется профиль равновесия берега: он примет форму откоса пляжного типа, а объем размыва грунта v_p станет равным объему аккумуляции наносов v_a . Интенсивность волновой переработки берегов (отступление бровки берега) достигает в первые годы существования крупных водохранилищ 50...70 м в год, постепенно затухая в течение 8...15 лет.

Казалось бы, после указанного срока контуры всех водохранилищ должны стабилизироваться, однако и далее их берега интенсивно размываются. Причина этого — *береговые течения*, возникающие при косом подходе волнового фронта (рис. 11.3, а) и имеющие значительные скорости. Так, волны высотой 1 м при

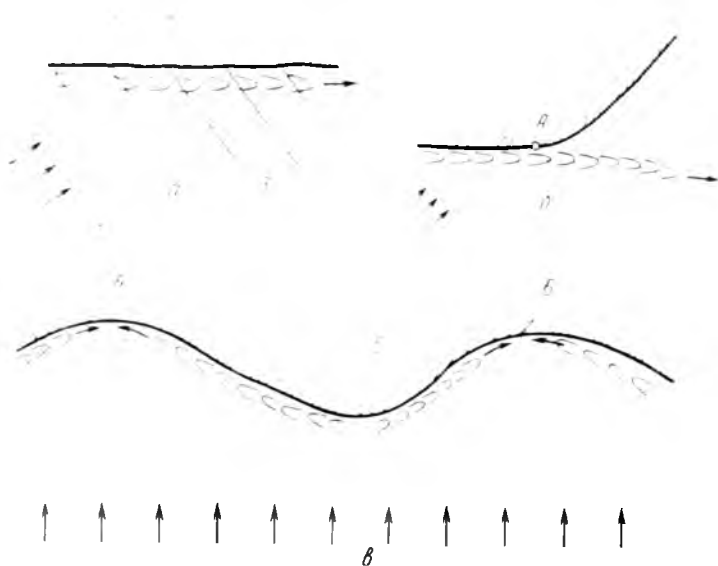


Рис. 11.3. Схемы формирования вдольбереговых течений:

а — у прямолинейного берега; б — при наличии излучины; в — у извилистого участка берега; 1 — береговая линия; 2 — вдольбереговое течение; 3 — фронт волны; 4 — направление ветра; 5 — размываемые участки берега; 6 — зоны отложения продуктов размыва

подходе к берегу могут вызывать течение со скоростью 1,5...2,5 м/с. Такой поток, размывая подводные отложения, способен транспортировать их на значительные расстояния не только вдоль берега, но и в глубоководную зону. Последнее возможно, если вдольбереговое течение формируется у прямолинейного участка береговой линии с резким перегибом в точке А (рис. 11.3, б). Насыщенный наносами поток с повышенной плотностью, двигаясь по инерции, в точке перегиба отрывается от берега, унося продукты размыва в глубь водохранилища. Естественно, что это нарушает равновесие $v_p = v_a$ и провоцирует дальнейшее разрушение берегового склона.

Наличие вдольбереговых течений выравнивает береговую линию, способствуя интенсивному размыву выступающих участков берега (мысов) и занесению бухт (рис. 11.3, в). При фронте волны, совпадающем с общим направлением берега, имеющего местные искривления, вдоль последнего возникают течения, размывающие донные отложения у выступов и уносящие их в глубь бухт. Здесь потоки, движущиеся навстречу друг другу вдоль противоположных берегов, встречаются и, теряя энергию, освобождаются от транспортируемых наносов. По мере спрямления местной извилистости берегов интенсивность этого процесса снижается.

11.1.5. ИНЖЕНЕРНЫЕ МЕРОПРИЯТИЯ ПО УМЕНЬШЕНИЮ УЩЕРБА ОТ ЗАТОПЛЕНИЯ И ПОДТОПЛЕНИЯ ЗЕМЕЛЬ ПРИ СОЗДАНИИ ВОДОХРАНИЛИЩ

Задача снижения ущерба от затопления и подтопления земель особенно актуальна для равнинных рек, поймы которых являются наиболее ценными сельскохозяйственными угодьями, а подпор, созданный гидроузлом, распространяется на десятки и сотни километров. В этих условиях экономическая целесообразность создания водохранилища в значительной мере зависит от того, насколько много земель выпадет из сельскохозяйственного оборота. Конечно, затопление земель и подъем уровня грунтовых вод влияют и на другие отрасли народного хозяйства, обуславливая необходимость переноса населенных пунктов, промышленных предприятий, дорог, линий электропередач, затрудняя работу шахт и карьеров по добыче полезных ископаемых, и т. д. Одна из мер уменьшения ущерба от затопления — *обвалование* земель (ограждение их дамбами). Наиболее эффективно обвалование мелководий с глубинами менее 2 м, часто составляющих большую долю площади водного зеркала при незначительных объемах запасенной здесь воды. Эта мера одновременно уменьшает потери на испарение с водной поверхности, улучшает экологическую обстановку в водохранилище и

на прилегающей территории: на мелководьях наиболее активно развиваются биологические процессы, ухудшающие качество воды; они являются местом массового размножения комаров.

Обвалованные территории, вследствие общего подъема грунтовых вод и фильтрации через дамбы, являются сильно затопленными. Их хозяйственное использование возможно только после проведения мелиоративных мероприятий: подсыпки грунта до отметок, превышающих уровень воды в бьефе (это требует значительных затрат и выполняется на небольших площадях, отводимых под застройку), либо осушения. Последнее обычно осуществляют одним или несколькими рядами вертикальных дренажных скважин с принудительной откачкой, параллельными урезу воды, либо другими способами.

Наносы, откладываясь в водохранилищах и подпертых бьефах, вызывают распространение подпора вверх по реке, а в НБ водозаборных гидроузлов — подъем уровней, что увеличивает затопляемые и подтопляемые земли. Таким образом, способы рационального регулирования наносного режима водотока в районе гидроузла, позволяя сохранить полезную емкость водохранилища и пропускную способность отводящего русла, являются в то же время средствами защиты прилегающих территорий.

Защита водохранилищ от занесения крупными наносами может осуществляться строительством выше по реке подпорных и регулирующих сооружений, уменьшающих скорости потока и способствующих задержке крупных фракций на подходе к гидроузлу на пойме (если продуктивность последней невелика и занесение ее крупными наносами не нанесет заметного ущерба). На горных реках выше основного водохранилища могут создаваться емкости (наносохранилища) для аккумуляции крупных фракций: в этом случае поступающая из них вода содержит только взвешенные частицы, что существенно увеличивает время заиливания ВБ. В этих же условиях рациональным может быть создание наливного водохранилища (рис. 11.4). В качестве регулирующей емкости здесь используют естественное понижение местности (например, пересохшее старое русло), подавая туда воду из подпертого бьефа плотинного водозаборного гидроузла, частично освобожденную от наносов. В отличие от долинного (созданного непосредственно в русле), в заиливании наливного водохранилища участву-

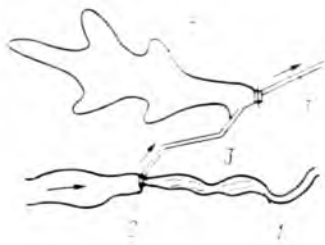


Рис. 11.4. Схема наливного водохранилища:

1 — река; 2 — водозаборный гидроузел; 3 — канал; 4 — наливное водохранилище

ет не весь объем стока реки, а только та его часть, которая идет на заполнение емкости, поэтому расчетный срок работы такого сооружения может быть большим.

Если в реке преобладают мелкие частицы во взвешенном состоянии, поток, поступающий из нее в водохранилище, не смешиваясь с основной массой воды, распространяется в придонной зоне на значительное расстояние, достигая плотины. При наличии в последней донных отверстий наносы вместе с водой можно пропускать в НБ.

Наносы, отложившиеся в подпертых бьефах в водохранилищах относительно небольших гидроузлов, имеющих донные отверстия, могут быть смыты в реку, если паводковые расходы пропускать при сниженном уровне ВБ. Это позволяет создать вблизи плотины значительные скорости потока, размывающие мелкие отложения.

Уменьшить ущерб от затопления можно, снизив интенсивность переработки берегов водохранилищ. Поскольку главной причиной разрушения берегов является волновое воздействие, участки, наиболее подверженные волною, укрепляют посадкой влаголюбивых кустарников, тростника. Более дорогое — крепление каменной наброской или железобетонными элементами, строительство специальных волнозащитных конструкций. В местах развития вдольбереговых течений возводят регулирующие сооружения (см. гл. 7).

В НБ водозаборных гидроузлов затопление земель (обычно кратковременное) вызывается отложением наносов и снижением пропускной способности русла, что приводит к наводнениям при пропуске паводков. Наиболее эффективная мера борьбы с этим — ежегодные попуски с руслоформирующими расходами, позволяющими промыть отложившиеся наносы. Возможно уменьшить занесение НБ формированием однорукавного глубокого русла, с целью максимального увеличения транспортирующей способности потока. Если расходы, подаваемые в НБ, все же недостаточны для транспортирования сбрасываемых через гидроузел наносов, целесообразно устройство здесь карьеров строительных материалов (песка и гравия) с такой организацией разработки, которая позволила бы расчистить основное русло к моменту пропуска паводка.

Значительные разрушения берегов НБ энергетических гидроузлов вызывают резкие колебания уровней при смене режимов работы ГЭС, ниже которых целесообразно устройство водохранилищ суточного или недельного регулирования, позволяющих снизить амплитуду этих колебаний.

11.1.6. ТЕМПЕРАТУРНО-СОЛЕВОЙ И ЛЕДОВЫЙ РЕЖИМЫ ВОДОТОКА В РАЙОНЕ ВОДОХРАНИЛИЩА

В средних и больших водохранилищах сезонные температурные колебания проникают на небольшую глубину, а температура в глубинных слоях остается постоянной — 2...4 °С. Резко возросшая по сравнению с бытовыми условиями площадь водного зеркала увеличивает потери на испарение; оказавшаяся на поверхности вода с повышенным содержанием солей, как более тяжелая, опускается, сосредоточиваясь в мертвом объеме. Постепенно здесь возрастает минерализация, а по мере накопления продуктов разложения органических веществ уменьшается содержание кислорода, и вода насыщается сероводородом. Это приводит к ухудшению ее качества, что особенно важно для объектов водоснабжения и орошения.

Мерой борьбы с ухудшением качества воды могут служить периодические попуски через донный водоспуск, позволяющие обновить мертвый объем водохранилища. С созданием гидроузлов, особенно крупных, резко меняется и ледовый режим реки: малые скорости в ВБ обуславливают ранний (на 5...8 сут раньше бытовых условий) ледостав и повышенную (на 15...20% и более) толщину льда. По тем же причинам водохранилища вскрываются позже, чем реки. Изменяется и характер ледохода: при средней скорости потока на подходе к плотине, меньшей 0,5 м/с, лед задерживается и тает в ВБ, что благоприятно сказывается на солевом режиме (минерализация льда в 4...5 раз меньше, чем воды, сброс его приводит к росту концентрации солей).

Меняется ледовый режим и ниже гидроузла: в период ледостава попуски относительно теплой воды из ВБ задерживают образование ледового покрова на реке, а весной ускоряют его вскрытие. На участке НБ, непосредственно прилегающего к плотине, ледовый покров может не устанавливаться вообще: так, в НБ Красноярской ГЭС незамерзающая полынья простирается на несколько десятков километров, являясь активным источником образования шуги и тумана.

11.1.7. ИЗМЕНЕНИЕ БИОЛОГИЧЕСКОГО РЕЖИМА РЕК ПОСЛЕ СОЗДАНИЯ ВОДОХРАНИЛИЩ

Нарушение сложившегося веками режима скоростей и температур изменяет биологический режим водотока. В первую очередь это проявляется в создании помех на путях нереста рыбы, когда верховья рек, где обычно рыба мечет икру, оказываются отрезанными подпорными сооружениями. В том случае,

если нерестилища расположены в НБ, несовпадение графика расходов, диктуемого энергетикой или орошением, с требованиями рыбного хозяйства вызывает колебания уровней в реке, приводящие к обсыханию и гибели икры. Указанные обстоятельства обуславливают сокращение стада наиболее ценных проходных и полупроходных рыб; в водохранилищах размножаются менее ценные озерные породы. Уменьшения вредных последствий вмешательства в экосистему реки добиваются строительством рыбопропускных сооружений, рыбообразовных заводов при средне- и высоконапорных гидроузлах. В интересах рыбного хозяйства в период нереста через водопропускные сооружения гидроузлов дают попуски, позволяющие воспроизвести естественные условия размножения рыбы на затопляемой пойме, проводят мелнорацию нерестилищ, намывают искусственные галечные отмели, служащие местом икрометания некоторых пород рыб, и т. д.

Условия обитания в водохранилищах благоприятны для жизни озерной рыбы. Наличие прогреваемых солнцем мелководий с водной растительностью, обилие органических веществ на затопленной территории обуславливают значительно большую кормность каждого гектара водоема, чем в естественных условиях, что благоприятствует рыбоводству. При правильной его организации водохранилища могут быть источником дешевой рыбной продукции.

После затопления ложа водохранилища меняется и растительный мир: берега зарастают влаголюбивыми растениями — тростником, камышом, рогозом; на подтопленных территориях разрастается ольха, береза и т. д. На мелководьях бурно развиваются водоросли, в том числе микроскопические синезеленые. Сносимые с полей удобрения, особенно азотсодержащие, ускоряют их развитие. Значительные объемы биомассы и продуктов ее распада снижают содержание кислорода в воде, ухудшают ее питьевые качества, придают неприятный вид и запах. Важные меры борьбы с «цветением» — тщательная подготовка ложа водоема к затоплению (удаление органических остатков), отсечение мелководий, а также регулирование численности и породного состава рыбного стада для поддержания благоприятного баланса биомассы.

11.1.8. ВЛИЯНИЕ ВОДОХРАНИЛИЩ НА ПРИРОДНО-КЛИМАТИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ РАЙОНА СТРОИТЕЛЬСТВА

Являясь мощным аккумулятором тепла и влаги, водохранилище оказывает влияние на температурно-влажностный режим прилегающего региона. С поверхности водного зеркала испаря-

ется до 10% потребляемой воды, что повышает влажность воздуха в северных районах на 4...6%, в южных — на 6...12%. Запасы тепла в крупных водохранилищах оказывают отопляющее влияние зимой и охлаждающее — летом, вызывая запаздывание вегетационного периода до 8...10 сут. Тепловые и влажностные потоки, формирующиеся над водоемами, вносят возмущение в перемещение масс воздуха, приводя к изменению сложившейся розы ветров, их усилению: так, на Рыбинском водохранилище средняя скорость ветра в августе увеличилась на 25...30%.

Интересный и малоизученный пока вопрос — влияние водохранилищ на сейсмический режим района. Отмечено, что после заполнения водохранилищ ряда крупных (с напором 100 м и более) гидроузлов резко возрастает возможность возникновения разрушительных землетрясений там, где они ранее не отмечались.

11.1.9. МЕРОПРИЯТИЯ ПО ПОДГОТОВКЕ ЛОЖА ВОДОХРАНИЛИЩА

До начала строительства должны быть полностью проведены разведывательные работы по изысканию полезных ископаемых, необходимые археологические раскопки, выполнены объективные прогнозы влияния будущего гидроузла на экологическую обстановку прилегающего региона.

При необходимости наиболее ценные и редкие виды животных и растений, имеющие распространение на затопляемых и подтопляемых территориях, переселяются с восстановлением их видового состава и численности вне зоны влияния водохранилища.

На территориях, подлежащих затоплению, выполняют следующие работы:

- вынос за пределы зоны затопления населенных пунктов, промышленных и сельскохозяйственных объектов;

- изучение памятников культуры, перенос из зоны затопления или защита наиболее важных из них, подробное описание и фотографирование затопляемых объектов;

- перенос дорог, трубопроводов, линий электропередач и связи.

Важную роль имеют мероприятия по обеспечению санитарного состояния будущего водохранилища, такие, как:

- обеззараживание и вынесение из зон затопления и подтопления инфекционных кладбищ и скотомогильников, обеззараживание очистных сооружений;

- обвалование мелководий и проведение мелиоративных работ на их территориях;

лесосводка и лесоочистка с вывозом полученной древесины; снесение и вывоз остатков деревянных сооружений; разработка или закрепление торфяников.

Удаление древесины и торфа важно не только с позиций санитарного обеспечения. Кроме того, что они являются дефицитным сырьем, всплывание стволов деревьев и торфяных островов затрудняет судоходство, мешает освоению водоема в интересах рыбного хозяйства, а попадание их в отверстия водосбросных и водопропускных сооружений может вызвать катастрофические ситуации.

В целях рыбохозяйственного использования водоема образуют искусственные нерестилища и тоневые участки (места отлова рыбы).

В необходимых случаях укрепляют берега, осуществляют противооползневые мероприятия, а из береговых зон, подверженных размыву, выносят дороги и линии коммуникаций.

Иногда проводят противофильтрационные мероприятия, препятствующие утечке воды через дно и берега водохранилища в виде глинистой или пленочной одежды по всей площади ложа водоема или в наиболее проницаемой его зоне, если основание сложено мощными пластами с большой водопроницаемостью.

По берегам должны быть проведены водоохранные мероприятия с целью воспрепятствовать загрязнению водоема. Необходимо выполнить и мероприятия по его рекреационному освоению: планировку берегов и отсыпку или намыв пляжей, расчистку будущих мест массового купания.

11.2. КОМПОНОВКА РЕЧНЫХ ГИДРОУЗЛОВ

Компоновку гидроузла выбирают в зависимости от народнохозяйственного назначения, напора, гидрологических условий водотока, топографических и геологических условий створа, климата района строительства, наличия тех или иных местных строительных материалов и даже производственного опыта организации, которая будет осуществлять строительство. Очевидно, решение столь многофакторной задачи возможно только на основе технико-экономического сравнения вариантов с дополнительным учетом тех факторов экологического и социально-психологического характера, экономическая оценка которых пока затруднительна.

Обоснование компоновки гидроузла начинают с выбора его створа. Основой при этом является схема комплексного использования водотока, составленная с учетом потребностей всех участников водохозяйственного комплекса (мелиорация, энергетика, водный транспорт, рыбное хозяйство и др.) и располагаемых водных ресурсов. На основе топографических, гидро-

логических и геологических изысканий в районе будущего объекта намечают несколько створов, учитывая свойства пород основания, наличие местных строительных материалов (грунта, камня, заполнителей для бетона), удобство производства работ и пропуска расходов реки в период строительства, удаленность от транспортных коммуникаций, возможности расположения жилых поселков и производственной базы и т. д. По каждому из намеченных створов осуществляют проектные проработки, определяя габаритные размеры каждого из сооружений и наиболее рациональные варианты их размещения. Обычно на этом этапе широко используют аналоговое проектирование, привлекая положительный опыт отечественного и зарубежного гидротехнического строительства в близких природно-климатических условиях. Окончательное положение створа устанавливают на основе сопоставления вариантов; при этом в основном формируются компоновочная схема объекта, состав и конструктивные схемы сооружений, в него входящих.

11.2.1. ОСНОВНЫЕ ТРЕБОВАНИЯ К КОМПОНОВКАМ

Согласно М. М. Гришину, можно выделить следующие группы требований:

эксплуатационно-технические определяются в основном условиями гидравлического режима в бьефах гидроузла и удобством обслуживания и ремонта входящих в него сооружений. При этом каждое из них должно в полной мере выполнять свои функции, оказывая минимальное вредное влияние на работу других. Обычно такие помехи возникают при близком расположении водосбросных и специальных сооружений (здание ГЭС, судоходный шлюз, береговой водозабор). Так, высокие скорости потока, проходящего через водосброс, могут затруднять подходы к судопропускным сооружениям, создавать сбойные течения в НБ, снижая эффективность работы ГЭС и рыбоходов, и т. д. С этих позиций, а также из условий ремонта желательно удаление водосбросов от других сооружений;

техничко-экономические сводятся к тому, что стоимость гидроузла с учетом расходов на его эксплуатацию должна быть минимальной. Это определяет необходимость всемерного использования местных строительных материалов, прогрессивных способов строительства, экономичных конструкций, требующих наименьших затрат труда и дефицитных материалов, и т. д.

Снижению стоимости строительства способствует применение совмещенных конструкций: водосброс — водоспуск; здание ГЭС совмещенного типа (с водосбросными отверстиями) и др. Важное условие снижения стоимости массового строительства

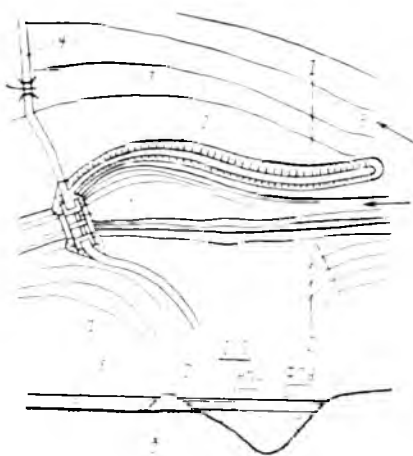


Рис. 11.5. Схема гидроузла с пропуском части паводкового расхода по пойме реки:

а — план; б — разрез; 1 — водосбросная плотина с низким порогом; 2 — сопрягающая дамба; 3 — пойма; 4 — дорога, затопляемая в паводок; 5 — направление движения воды в паводок

в условиях гидросистем — использование типовых сборных и сборно-монолитных конструкций, конструкций повторно-го применения, унифицированных затворов и подъемников, гидроагрегатов, машин.

Большой эффект могут дать нетрадиционные схемы компоновок: предусматривающие пропуск части катастрофических расходов по затопливаемой в паводок пойме реки (рис. 11.5), с использованием в качестве катастрофических водосбросов естественных понижений местности.

Важное требование к компоновкам крупных объектов — возможность начала эксплуатации гидроузла до завершения его возведения: пуск ГЭС на пониженных напорах, подача воды на орошение при ча-

стично заполненном водохранилище. Часто стоимость дополнительной продукции, полученной за время строительства, оказывается соизмеримой с затратами по гидроузелу;

строительно-производственные направлены на выбор компоновки, позволяющей сократить время строительства. Прежде всего, компоновка должна обеспечить удобный и надежный пропуск строительных расходов реки, создающий минимум производственных помех.

Рациональное использование высокопроизводительной строительной техники требует широкого фронта работ, как бетонных, так и земляных; с этих позиций желательно соединение всех бетонных работ в одном комплексе, позволяющее уменьшить дальность перевозки бетона, арматуры и т. д. Компактная компоновка бетонных сооружений дает возможность также уменьшить число трудоемких сопряжений с грунтовой плотной, являющихся зонами повышенной фильтрации. Заметим, что часто это условие входит в противоречие с эксплуатационно-техническими требованиями, ухудшая гидравлический режим работы сооружений.

Компоновка гидроузла должна предусматривать возможность его дальнейшего развития и реконструкции: повышения напора, устройства дополнительных судопропускных сооруже-

ний, ГЭС и водозаборов и т. д. Пример — Днепровский гидроузел им. В. И. Ленина, где без перерывов в работе объекта были построены второе здание ГЭС и судоходный шлюз, при этом мощность станции возросла более чем вдвое.

Важным требованием, предъявляемым к компоновочным решениям, является их архитектурная выразительность. Обычно это достигается использованием рельефа местности, единством архитектурного решения всего комплекса сооружений, тщательно продуманной схемы озеленения.

11.2.2. СХЕМЫ ОРГАНИЗАЦИИ ПРОПУСКА РАСХОДОВ РЕКИ В ПЕРИОД СТРОИТЕЛЬСТВА ГИДРОУЗЛОВ

Строительно-производственное требование удобства пропуска расходов реки в период строительства часто лежит в основе компоновочного решения, особенно при строительстве на полноводных реках.

В гидротехнической практике существуют две основные схемы строительства: без отвода воды из русла реки и с отводом из той его части, где расположена строительная площадка.

Возведение сооружений без отвода воды из русла. При реализации этой схемы возможны два метода строительства — бесперемычный и метод секционных перемычек.

Бесперемычный метод. Одна из схем такого метода приведена на рисунке 11.6. Со специального судна-понтона 1

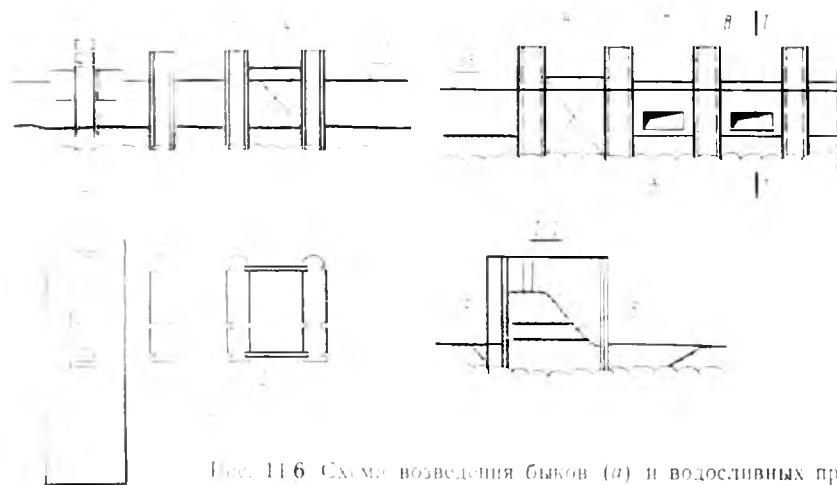


Рис. 11.6. Схема возведения быков (а) и водостивных проделов (б) бетонной плотины бесперемычным методом

1 — монтажный понтон; 2 — монтаж дополнительных секций; 3 — заполнение бетоном; 4 — заграждения в пазах быков; 5 — опускной колодец; 6 — ножевая часть колодца; 7 — быки; 8 — донные отверстия; 9 — затворы донных отверстий

на дно опускают открытую сверху и снизу тонкостенную оболочку 5 (опускной колодец), имеющую в плане форму быка плотины. Нижняя часть оболочки выполнена заостренной и снабжена металлическим «ножом» 6. В основание она заглубляется под собственным весом, по мере разработки и удаления грунта из внутренней полости; при этом оболочку наращивают сверху дополнительными секциями 2. После установки опускного колодца в проектное положение его внутреннюю полость заполняют бетоном 3, получая, таким образом, готовый бык плотины. Опустив в пазы соседних быков ограждения 4, из пространства между ними откачивают воду и бетонируют тело водосбросной плотины либо другого сооружения. Расходы реки в это время проходят через неогражденное пространство между другими быками. Для полного перекрытия напорного фронта в части пролетов, возводимых за ограждениями, устраивают донные отверстия 8, снабженные затворами 9, пропуская через них расходы реки. Эти отверстия можно использовать в период эксплуатации либо забетонировать после включения в работу основных водопропускных сооружений.

Возможна и другая схема закрытия напорного фронта, представленная на рисунке 11.7. На первом этапе, последовательно устанавливая затворы-ограждения 6 в разные пролеты, бетонируют фундаментную плиту по всему фронту бетонных сооружений. На втором этапе в пазы быков каждого второго (или третьего и т. д.) пролета устанавливают затворы, под защитой которых наращивают порог водослива до промежуточной отметки В, пропуская строительные расходы через смежные пролеты на уровне отметки А верха фундаментной плиты. На третьем этапе расходы реки пропускают через пролеты 1, 3 с порогом на отметке В, бетонируя под защитой затворов большей высоты тело водослива в пролетах 2, 4. После завершения этого этапа затворы вновь перемещают в пролеты 1, 3 и т. д., вплоть до завершения строительства. Этот способ достройки плотины называют *способом гребенки* и наряду с описанным выше *способом донных отверстий* широко применяют в практике гидротехнического строительства.

Бесперемычный метод с использованием опускных колодцев позволяет ускорить строительство, но применим лишь для возведения низконапорных сооружений, так как с повышением напора резко возрастают габаритные размеры и вес колодцево-оболочек, сложность и трудоемкость производства работ. Ограничивает его применение и сложность подводной разработки прочных грунтов при погружении оболочки.

Строительство речных сооружений бесперемычным методом возможно и с применением наплавных конструкций. В нашей стране этот метод применяли при возведении приливной Кисло-

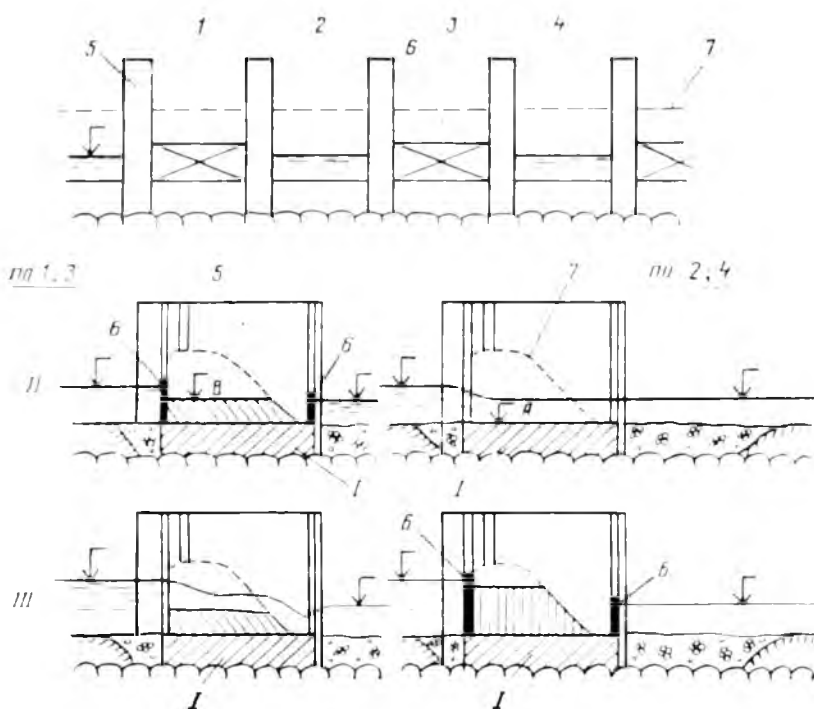


Рис. 11.7. Схема возведения водосливных пролетов плотин методом гребенки: I...III — этапы строительства; 1...4 — пролеты плотины; 5 — бьеж; 6 — затвор; 7 — проектный профиль водослива

губской электростанции, где на плаву к месту установки был доставлен блок с габаритными размерами $42,5 \times 18,3 \times 16,05$ м и массой 5200 т, изготовленный на расстоянии более 100 км от отвора гидроузла.

Наибольшую сложность при использовании наплавных конструкций представляет подготовка основания, обеспечивающая надежный контакт бетона с грунтом и устройство уплотнений в швах между соседними секциями, ограничивая их применение низконапорными сооружениями.

Метод секционных перемычек. Схема этого метода приведена на рисунке 11.8. Бетонные сооружения возводят в две или более очереди. Сначала перемычками продольной I и поперечными 5, 8 отгораживают строительную площадку первой очереди, пропуская расходы реки через стесненное русло. Из пространства между перемычками откачивают воду и насухо возводят первую очередь гидроузла (на рис. 11.8 это здание ГЭС и один пролет водосбросной плотины), устраивая донные

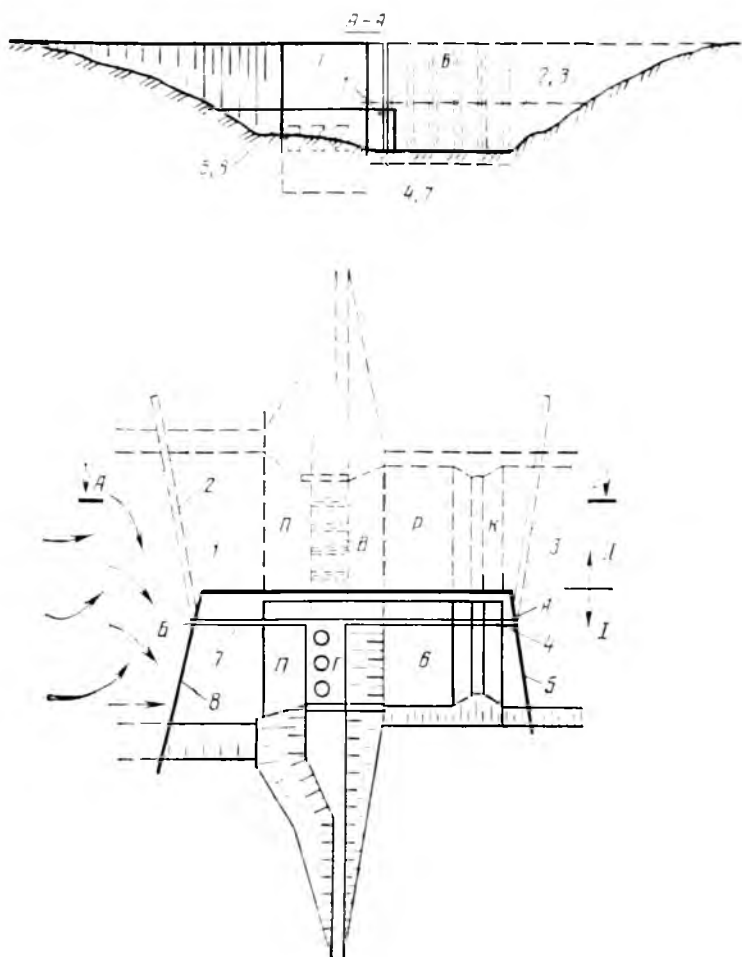


Рис. 11.8. Схема возведения гидроузла методом секционных перемычек:

I, II — очереди строительства; *В* — плотина; *Г* — здание ГЭС; *П* — понур; *Р* — ризберма; *К* — ковш; *1, 5, 8* — перемычки *I* очереди; *6* — разделяющая стенка; *2, 3, 4, 7* — перемычки *II* очереди

отверстия или пониженный порог в плотине. На следующем этапе строительства в котловане сооружают продольную перемычку *4, 7* второй очереди, замкнув ее на бетонные конструкции, например разделяющую стенку *6* между плотиной (*В*) и ГЭС (*Г*), разбирают поперечные перемычки *5, 8*, затапливая котлован, и отсыпают в воду верховую поперечную перемычку *2*, соединив ее с продольной. По мере роста перемычки *2* уровень

воды перед сооружением поднимается, и строительные расходы проходят через отверстия в сооружениях первой очереди. Затем отсыпают низовую перемычку 3, осушают котлован и насухо возводят сооружения второй очереди до отметок, превышающих уровень воды перед гидроузлом. На следующем этапе разбирают перемычки второй очереди и достраивают плотину и ГЭС способом гребенки или донных отверстий.

Метод секционных перемычек применяют при строительстве средне- и высоконапорных гидроузлов на многоводных реках с высокой поймой либо речных низконапорных сооружений, когда создаваемый ими подпор распространяется только в пределах русловой части речной долины.

Возведение сооружений с отводом воды из русла. Эту схему широко используют при возведении гидроузлов любых напоров в узких створах, когда невозможно применение метода секционных перемычек, а также на многоводных реках с широкой поймой. В первом случае воду из русла отводят туннелями 1 (рис. 11.9), галереями (трубой) 9, устраиваемой под плотиной в береговом массиве лотком или обводным каналом, во втором — через канал, проложенный на пойме.

Схема строительства с отводом воды туннелем или галереей представлена на рисунке 11.9. Для отвода строительных расходов реки в скальном массиве одного из берегов (иногда в обоих) прокладывают туннель 1, входной 3 и выходной 4, порталы которого расположены за пределами строительного котлована. Галерею 9 (чаще при скальных основаниях) укладывают в траншее, за пределами русла, подводят воду к ней каналом 2.

Расходы реки в туннель или трубу переключают в межени период, отсыпая в русло по всей его ширине (с моста или наплавных средств), либо с берегов банкет из камня в створе одной из перемычек 6, 8. По мере роста банкета уровень воды перед ним поднимается, и расходы поступают во временный строительный водосброс (туннель, галерею). Перекрытие заканчивается после выхода гребня банкета из воды, когда почти весь расход (за исключением расхода фильтрации через тело банкета) проходит вне русла. Затем в спокойную воду отсыпают вторую перемычку и постепенно наращивают их высоты, создавая напор, достаточный для пропуска через строительный водосброс расчетного паводкового расхода. Высота верховой перемычки при этом может достигать $1/4 \dots 1/3$ высоты плотины.

При таком методе плотину строят по всему фронту гидроузла, постепенно уменьшая открытие затворов временного водосброса и повышая уровень ВБ. С ростом напоров расходы реки переключают на временные или постоянные глубинные водосбросы.

В средненапорных гидроузлах строительный водосброс без

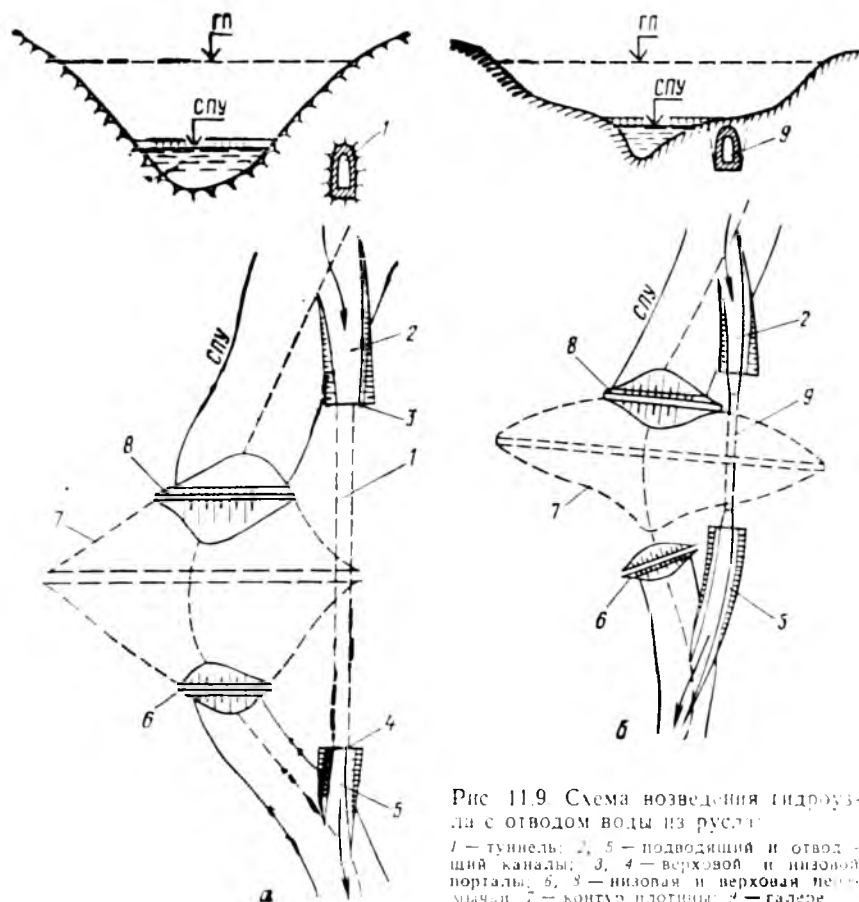


Рис 11.9 Схема возведения гидроузла с отводом воды из русла

1 — туннели; 2, 5 — подводящий и отводящий каналы; 3, 4 — верховой и низовой порталы; 6, 8 — низовая и верховая перемычки; 7 — контур плотин; 9 — галерея

существенных переделок можно использовать после завершения строительства в качестве эксплуатационного водосброса, водозабора или водоспуска; в высоконапорных это хотя и требует значительного объема дополнительных работ, но также часто экономически оправдано.

Разновидность схемы с отводом воды из русла — *пойменный метод* строительства (рис. 11.10). Бетонные сооружения гидроузла располагают на низкой и широкой пойме реки. Строительство их ведут в котловане, огражденном дамбами, если пойма затапливается в паводок. Бетонную плотину 6 и ГЭС 5 возводят частично или на полную высоту, оставляя донные отверстия либо недостроенные водосливные пролеты для пропуска расходов реки во вторую очередь строительства. После подъема вер-

Рис. 11.10. Схема возведения гидроузла пойменным методом:

1, 11 — очереди строительства; 1 — бетонная плотина; 2, 4 — верхняя и низовая перемычки; 3 — грунтовая плотина; 5 — здание ГЭС; 6 — «гребенка» плотины

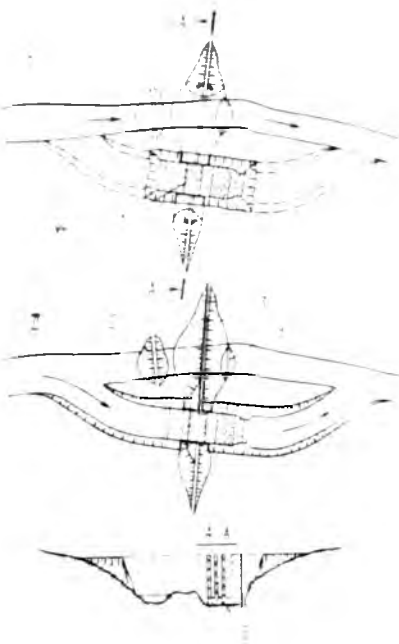
ха бетона до расчетных отметок участки подводящего и отводящего каналов, примыкающие к реке, разрабатывают, открывая доступ воды к временным водосбросным отверстиям. После перекрытия русла перемычками 2, 4 расходы реки переключают в канал, а в осушенном русле выполняют грунтовую плотину. По мере ее роста бетонные сооружения достраивают способом гребенки или донных отверстий.

Пойменный метод получил широкое распространение на многоводных равнинных реках при строительстве гидроузлов среднего напора. Достоинство его: возможность возведения бетонных сооружений без вмешательства в естественный режим водотока, вплоть до момента перекрытия. Это облегчает условия судоходства, пропуска льда, леса и рыбы, а главное дает возможность отказаться от трудоемких и дорогих продольных перемычек и сократить за счет этого срок возведения сооружений. Определенный недостаток пойменного метода — большой объем выемок по котловану и каналам, однако при использовании вынутого грунта для отсыпки плотины это обстоятельство становится несущественным.

11.2.3. КОМПОНОВКИ СООРУЖЕНИЙ В НИЗКОНАПОРНЫХ ГИДРОУЗЛАХ

Характерная особенность низконапорных гидроузлов — расположение всех сооружений в русле реки или в пределах низкой поймы.

Чаще всего их возводят для целей водозабора, особенно на горных и предгорных участках рек, но они могут иметь и другое назначение: создание подпора для обеспечения судоходных глубин на равнинных реках (рис. 11.11), а иногда и комплексное,



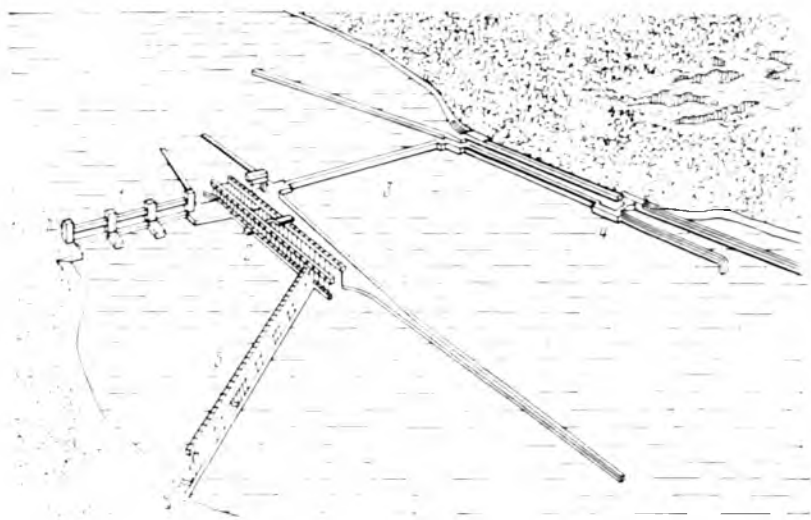


Рис. 11.11. Схема гидроузла на равнинной реке для целей судоходства: 1, 2 — водосбросная и разборчатая плотины; 3 — рыбопропускное сооружение; 4 — судоходный шлюз; 5 — направляющее устройство рыбопропускного сооружения

когда в состав гидроузла входят несколько специальных сооружений, в том числе и гидроэлектростанция.

Низконапорные узлы могут также создавать на оврагах и балках небольшие водохранилища — пруды, использующие местный сток.

Назначение гидроузлов определяет и их состав: на реках в качестве подпорного сооружения используют бетонные водосливные и водосбросные плотины; при транспортном назначении объекта подпорным сооружением служит обычно разборчатая плотина 3 (см. рис. 11.11) с использованием поворотных ферм или рам, эластичных или других большепролетных затворов. При строительстве прудов подпор создают грунтовой плотиной, обычно однородной из суглинистых или супесчаных грунтов с простейшими креплениями откосов. Грунтовые плотины могут входить и в состав речного гидроузла, если подпор распространяется за пределы русла либо если фронт, создаваемый бетонными сооружениями, меньше ширины русла.

В речных гидроузлах бетонная подпорная плотина совмещает функции водосброса, а иногда и водоспуска. В узлах на местном стоке водосброс, обычно берегового типа, открытый (по типу быстротока или консольного перепада) или закрытый, трубчатый, как правило, автоматического действия. Водоспуски та-

ких объектов чаще всего делают из металлических или асбестоцементных труб с регулирующими задвижками в НБ.

В состав речных гидроузлов, в зависимости от назначения, могут входить водозаборы, регулирующие дамбы, судоходные шлюзы, рыбоходы, здания гидроэлектростанций и др. Все перечисленные сооружения участвуют в создании напорного фронта.

В состав низконапорного гидроузла на равнинной реке (см. рис. 11.11), служащего для создания судоходных глубин, входят водосбросная 1 и разборчатая 3 плотины, судоходный шлюз 4 и рыбопропускное сооружение 2. Рыба, поднимающаяся по реке, движется к рыбоходу вдоль направляющего устройства 5. При всей разнице таких объектов общим для них является расположение бетонных сооружений в русле реки или на низкой пойме. Эта компоновка, характерная для низконапорных гидроузлов, носит название *русловой*.

В низконапорных русловых гидроузлах на реках с широкой поймой рациональна компоновка, приведенная на рисунке 11.5. Здесь водосбросная плотина 1 рассчитана на пропуск лишь части паводка. Максимальные расходы проходят при форсировке уровня с выходом на пойму 3. Бетонные сооружения устраивают у высокого (на рисунке — левого) берега, надежно сопрягая с ним бетонным устоем. Наиболее ответственная задача — сопряжение плотины с поймой: необходимо исключить подмыв плеча плотины при обтекании его потоком. Достигнуть этого можно устройством продольной дамбы 2, откосы и голова которой должны быть тщательно закреплены. При такой компоновке в период паводка могут возникнуть некоторые хозяйственные затруднения, так как дороги 4 и сельскохозяйственные угодья, расположенные на пойме, в том числе и в НБ, будут затоплены.

11.2.4. КОМПОНОВКИ СРЕДЕНАПОРНЫХ ГИДРОУЗЛОВ

Рассматривая средненапорные гидроузлы, удобно выделить два крайних случая: сооружение на реках с широкой поймой, когда длина напорного фронта в десятки и сотни раз превышает напор, и на водотоках с узкой поймой или вообще без нее. Первые характерны для равнинных и предгорных, вторые — для горных участков рек, а также при строительстве на малых реках, оврагах и балках. Компоновочная схема комплексного гидроузла первого типа приведена на рисунке 11.12, второго — 5.1.

При строительстве на равнинных реках в состав напорного фронта гидроузла могут входить (см. рис. 11.12) водосбросная плотина 3, здание ГЭС 2, судоходный шлюз 4 и рыбопропускное устройство, располагаемое обычно в теле раздельной стенки

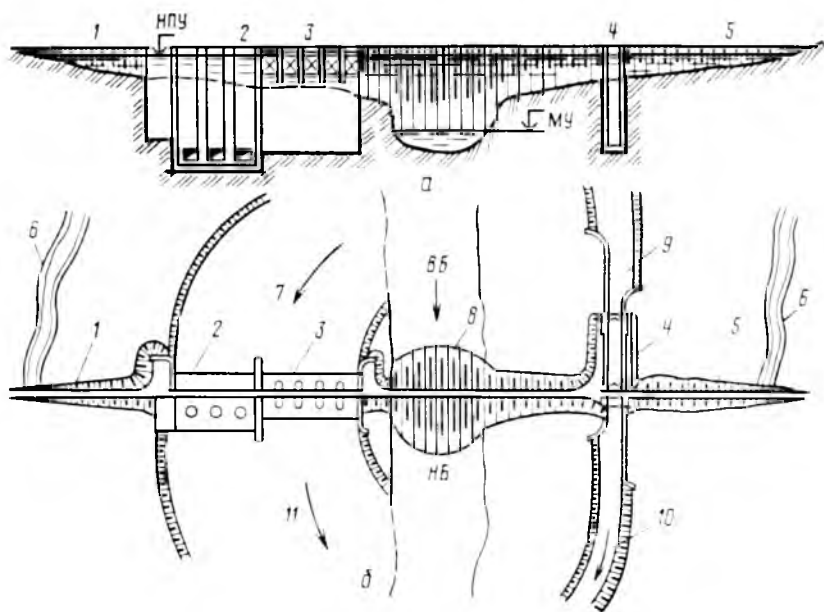


Рис. 11.12 Средненапорный гидроузел на равнинной реке:

а — профиль по оси гидроузла; *б* — план; 1, 5, 8 — грунтовые плотины; 2 — здание ГЭС; 3 — водосбросная плотина; 4 — судоходный шлюз; 6 — границы затопления в ВБ; 7, 9, 10, 11 — подводящий и отводящий каналы

между бетонной плотиной и ГЭС либо в устье последней. В зависимости от расположения основных бетонных сооружений (плотина и ГЭС) относительно русла реки компоновка может быть *русовой* (рис. 11.8) и *пойменной*, когда все они расположены в выемке на широкой пойме, а русло перекрыто глухой грунтовой плотиной (см. рис. 11.12). Судоходный шлюз может быть размещен в одном котловане с другими бетонными сооружениями, однако чаще его выносят на противоположный берег во избежание помех, создаваемых судам потоком в НБ, а иногда и в ВБ.

При строительстве средненапорных гидроузлов в относительно узких створах (см. рис. 5.1) напорный фронт создается обычно плотиной 1 из грунтовых материалов, а водосбросы выполняют берегового типа 2 либо трубчатыми — под плотиной; если основанием служит скала, возможны и туннельные водосбросные сооружения. Часто в состав такого объекта входит водоспуск 5, используемый обычно для пропуска расходов реки при строительстве, а в период эксплуатации позволяющий промыть ВБ от наносов, подать в русло санитарные расходы и даже, при необходимости, опорожнить водохранилище.

Главный функциональный элемент гидроузла — водовыпуск (водозабор) *б*, подающий воду потребителям. Как и водоспуск, его чаще всего выполняют трубчатым в выемке берегового склона; иногда удается совместить функции этих сооружений, располагая в трубе-галерее напорные трубопроводы с подачей на разные отметки.

Для этой схемы компоновки характерен полный отвод воды из русла и пропуск строительных расходов по обводному тракту — трубчатому или туннельному.

11.2.5. КОМПОНОВКИ ВЫСОКОНАПОРНЫХ ГИДРОУЗЛОВ

Высоконапорные гидроузлы возводят как на горных, так и предгорных и равнинных участках рек, чаще всего на скальных или полускальных основаниях.

Подпор в них может создавать как плотина из грунтовых материалов, так и бетонная (железобетонная). Хотя стоимость бетонной плотины всегда выше, чем плотины из местных материалов, она позволяет полностью или частично отказаться от дорогих береговых водопропускных сооружений, устроив их непосредственно в теле плотины. Поэтому суммарные стоимости вариантов объекта с бетонной или грунтовой плотиной оказываются соизмеримыми. Обычно гидроузлы на горных реках имеют энергетическое и мелиоративное назначение. Здание ГЭС приплотинного или подземного типа, причем подземные ГЭС чаще применяют с плотинами из местных материалов, иногда размещая непосредственно под плотиной, чтобы уменьшить длину напорных водоводов, а значит, гидравлические потери и потери мощности станции.

Средств для растопки в таких створах пропускают обычно через туннель, пробитый в береговом массиве (иногда в обоих), с отводом воды из русла. Поскольку стоимость туннельных работ велика, туннель стараются использовать и после завершения строительства в качестве отводящего участка основного или резервного водосбросов, отводящего или напорного туннелей гидроэлектростанций, иногда совмещая эти функции.

При строительстве высоконапорных гидроузлов в широких створах — на равнинных и предгорных участках рек — часто в состав их входит бетонная плотина с одним или несколькими ярусами водосбросных отверстий, в том числе и временных строительных, заделываемых после возведения напорного фронта до отметок, позволяющих переключить строительные расходы на нижний ярус эксплуатационных водосбросов. В теле бетонной плотины выполняют водоприемники и напорные водоводы ГЭС, располагаемой в НБ, непосредственно за плотиной.

Если длина водосбросной и щитовой (где размещены водоприемники ГЭС) частей плотины оказывается значительно меньше ширины напорного фронта, в состав гидроузла может быть включена плотина из местных материалов, сопрягающаяся с берегами и бетонными сооружениями.

Кроме указанных в состав гидроузла могут входить и другие сооружения: судопропускные, лесопропускные, водозаборные и т. д. Рыба через высоконапорный гидроузел не пропускается, поэтому в НБ организуют рыбобразовное хозяйство. Здесь особи мужского и женского пола, идущие на нерест, отлавливаются, производятся искусственное оплодотворение, инкубирование икры и дорашивание мальков, которых затем выпускают в реку выше и ниже плотины.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. В чем разница между водохранилищем и подпертым бьефом?
2. Как проявляется влияние создания водохранилища на гидрологический режим водотока в верхнем и нижнем бьефах?
3. Почему происходит понижение дна русла в нижнем бьефе гидроузлов, особенно на предгорных и горных реках?
4. Каковы причины интенсивной переработки берегов крупных водохранилищ?
5. Как уменьшить ущерб от затопления и подтопления земель при создании водохранилища?
6. Какие меры позволяют уменьшить интенсивность заиления и занесения водохранилищ?
7. Влияет ли создание водохранилища на климатический режим прилегающей территории? Почему?
8. В чем особенность развития водорослей (особенно синезеленых) в водохранилище? Каковы меры борьбы с ними?
9. Перечислите мероприятия, осуществляемые при подготовке ложа водохранилища. Каково назначение каждого из них?
10. Каковы требования, предъявляемые к компоновкам гидроузлов?
11. В каких случаях применяют схему строительства гидроузла с отводом воды из русла?
12. В чем достоинства и недостатки пойменной компоновки гидроузла в сравнении с русловой?

Глава 12. ИССЛЕДОВАНИЯ ГИДРОТЕХНИЧЕСКИХ СООРУЖЕНИЙ

12.1. ЛАБОРАТОРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ГТС

12.1.1. ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЙ, ИХ ОСНОВНЫЕ ВИДЫ

Необходимость проведения лабораторных исследований обусловлена невозможностью при проектировании ГТС на основе использования теоретических расчетов решить многие

вопросы с достаточной для практики точностью и надежностью. Поэтому лабораторные исследования ГТС на моделях получили широкое распространение. Эти исследования при соответствующей их постановке позволяют с достаточной точностью и достоверностью прогнозировать поведение в натуре будущего сооружения и найти оптимальные решения при его проектировании, отвечающие его экономичности и надежности.

Лабораторные исследования гидротехнических сооружений позволяют решить целый ряд вопросов как применительно к гидроузлам, так и отдельным сооружениям: наиболее рациональные из гидравлических условий компоновки гидроузлов, обеспечивающие благоприятные гидравлические режимы в русле на подходах к различным сооружениям (например, к судоводным шлюзам); предотвращение попадания донных наносов в водозаборные сооружения, отсутствие опасных размывов в НБ, рациональные конструкции креплений НБ. Такие исследования дают возможность изучать русловые процессы и влияние на их развитие различных регуляционных сооружений; кавитацию и вибрацию элементов сооружений, фильтрацию в основаниях сооружений, их береговых примыканиях, несущую способность сооружений (плотин), их оснований с учетом тектонических нарушений при воздействиях различного характера (статических, динамических, сейсмических, температурных). В лабораториях на образцах исследуют материалы (бетон, гипс и др.), грунты как основания сооружений. Имеется много научно-исследовательских институтов, отдельных крупных лабораторий (как самостоятельных, так и при вузах), в которых исследуют различные вопросы водохозяйственного и мелиоративного строительства. Например, Всесоюзный научно-исследовательский институт гидротехники (ВНИИГ) им. Б. Е. Веденеева, Всесоюзный научно-исследовательский институт гидротехники и мелиорации (ВНИИГиМ) им. А. Н. Костякова и др.

12.1.2. ОСНОВНЫЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ О ТЕОРИИ ПОДОБИЯ

Проектирование параметров моделей и пересчет данных модельных исследований на натуру проводят на основе законов подобия. Из теории подобия следует, что *явления называют подобными, если они протекают в геометрически подобных системах, в которых происходят процессы одинаковой физической природы и одноименные величины* (линейные размеры, скорости течения, ускорения и др.) *имеют между собой постоянные соотношения*. Рассматривают обычно две системы — натуру и модель, для которых должны быть постоянными масштабные коэффициенты или константы подобия α ,

а именно:

$$\begin{aligned}\alpha_L &= L/L_1; & \alpha_t &= t/t_1; \\ \alpha_v &= v/v_1; & \alpha_a &= a/a_1; \\ \alpha_P &= P/P_1; & \alpha_\rho &= \rho/\rho_1; \\ \alpha_\gamma &= \gamma/\gamma_1; & \alpha_v &= v/v_1\end{aligned}\quad (12.1)$$

и т. д.

где L и L_1 — линейные размеры этих систем (натуры и модели); t и t_1 — время; v и v_1 — скорости; a и a_1 — ускорения; P и P_1 — силы различной природы; ρ и ρ_1 — плотности; γ и γ_1 — объемные массы; v и v_1 — кинематические коэффициенты вязкости.

При рассмотрении *механического* подобия двух систем, к которому относятся случаи движения твердых тел и жидкости (где покой — статические воздействия — являются частным случаем), различают подобие геометрическое, кинематическое и динамическое.

Геометрическое подобие. Его выполняют, если все соответствующие линейные размеры натуры и модели, находятся в постоянном соотношении $\alpha_L = L/L_1$. Применительно к рисунку 12.1, а, в это будет

$$S/S_1 = B/B_1 = r/r_1 = H/H_1 = r_0/r_{01} = h/h_1 = b/b_1 = h_c/h_{c1} = \dots = \alpha_L, \quad (12.2)$$

а для схемы на рисунке 12.1, б

$$l/l_1 = c/c_1 = e_1 e_1 = f/f_1 = \dots = \alpha_L. \quad (12.2')$$

Требование геометрического подобия при моделировании должно соблюдаться не формально, а с учетом характера рассматриваемой задачи.

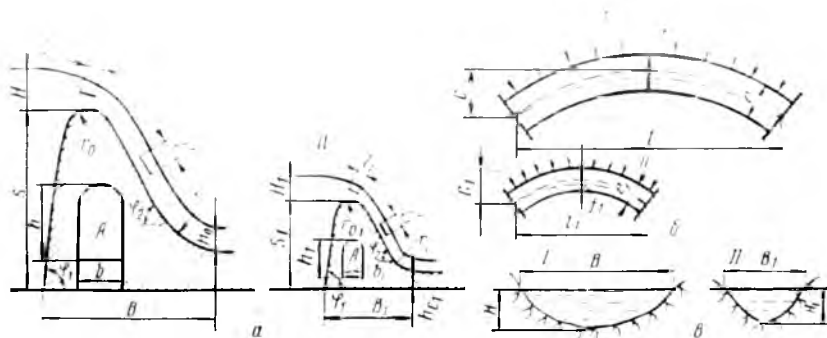


Рис. 12.1. Схемы для рассмотрения геометрического и кинематического подобия двух систем:

I — натура; II — модель

Из условия геометрического подобия масштабные коэффициенты для площадей и объемов можно записать:

$$\alpha_s = S/S_1 = \alpha_L^2 \text{ и } \alpha_v = v/v_1 = \alpha_L^3. \quad (12.3)$$

При исследовании русловых процессов моделирование проводя с искажением масштабов вертикального и горизонтального — это приближенное моделирование.

При исследовании напряженно-деформированного состояния используют строгое и нестрогое (приближенное) геометрические подобия.

Кинематическое подобие. При его соблюдении соответствующие частицы обеих систем (натуры и модели) должны совершать подобные перемещения в промежутки времени, находящиеся в постоянном соотношении

$$\alpha_t = t/t_1 = t'/t'_1,$$

где t — время перемещения частицей отрезка l (натуры и модели в соответствии с индексом), при этом $l/l_1 = \alpha_L$.

Кинематическое подобие осуществляется при соблюдении геометрического и динамического подобия.

Динамическое подобие. Закон динамического подобия выполняется согласно формуле (12.1), если

$$\alpha_P = P/P_1 = F/F_1 = R/R_1 = \dots = idem, \quad (12.4)$$

где P — силы тяжести; F — силы вязкости; R — силы инерции.

Соотношения между соответствующими силами, действующими в обеих геометрически подобных системах, должны быть одинаковыми для данных условий. Это относится к силам разной физической природы — P ; F ; R . Можно их принимать попарно, например $P/R = P_1/R_1$; $F/R = F_1/R_1$ или $P/R = idem$; $F/R = idem$. Слово *idem* показывает, что соотношение указанных сил одинаково для натуры и модели, то есть для двух рассматриваемых систем.

Одной из основных сил для движущегося тела является сила инерции, ее необходимо учитывать при моделировании. Она может быть выражена как произведение массы на ускорение. При простейших преобразованиях получим

$$R = Ma = \rho L^3 (L/t^2) = \rho L^2 v^2, \quad (12.5)$$

где ρ — плотность; L^3 — объем; a — ускорение; v — скорость, $v = L/t$.

Если это выражение подставить в формулу (12.5), то получаем

$$S/(\rho L^2 v^2) - Ne = idem, \quad (12.6)$$

то есть критерий Ньютона,

где S — какая-то любая из рассматриваемых сил (P , F и др.).

Для двух систем (натуры и модели) в развернутом виде формула (12.6) запишется

$$S/(\rho L^2 v^2) = S_1/(\rho_1 L_1^2 v_1^2). \quad (12.6')$$

Используя критерий Ньютона, получают частные законы динамического подобия (критерии подобия) при рассмотрении действия сил различной физической природы. Принимая за силу S какую-то из сил и пользуясь обратным выражением критерия Ньютона $(\rho L^2 v^2)/S$, можно получить основные законы динамического подобия.

Закон гравитационного подобия. Здесь за S принимают силу тяжести $P = \gamma L^3$ (где γ — объемная масса). Сделав подстановку, получаем

$$\frac{\text{Силы инерции}}{\text{Силы тяжести}} = \frac{\rho L^2 v^2}{\gamma L^3} = \frac{\rho}{\gamma} \frac{v^2}{L} = \frac{v^2}{gL} = Fr = idem —$$

критерий Фруда

Закон вязкостного подобия — критерий Рейнольдса. Его получают аналогичным путем, только вместо силы S подставляют силу вязкости $S = \mu L v$, тогда

$$\frac{\text{Силы инерции}}{\text{Силы вязкости}} = \frac{\rho L^2 v^2}{\mu L v} = \frac{\rho L}{\mu} \frac{v}{\nu} = Re = idem,$$

где $\nu = \mu/\rho$ — кинематический коэффициент вязкости.

Закон подобия динамических процессов при действии сил упругости. По закону Гука, выражение силы упругости запишется: $N = E \epsilon L^2$ (где E — модуль упругости; ϵ — относительная деформация), тогда

$$\frac{\text{Силы инерции}}{\text{Силы упругости}} = \frac{\rho L^2 v^2}{E \epsilon L^2} = \frac{v^2}{E/\rho} = Ca = idem —$$

критерий Коши.

Критерий при действии сил давления. Его получают из формулы (12.6')

$$\frac{\text{Силы давления}}{\text{Силы инерции}} = \frac{PL^2}{\rho L^2 v^2} = \frac{P}{\rho v^2} = Eu = idem —$$

критерий Эйлера.

Аналогично получают и другие критерии, например критерий Вебера — закон подобия при действии сил поверхностного натяжения (We), критерий гомохронности, или число Струхала (Sh), необходимый при моделировании неустановившегося движения жидкости, критерий Кармана-Ка и др.

Одновременное удовлетворение нескольким частным законам динамического подобия. При исследованиях сталкиваются с тем, что в динамическом процессе действуют силы различной физической природы. Пренебречь какими-то из них нельзя, так

как требуется одновременно удовлетворить нескольким частным законам, что создает сложности при моделировании. Например, легко установить, что удовлетворить одновременно двум критериям подобия (скажем, Fr и Re) практически невозможно. Здесь необходимо выяснить, какой критерий подобия является решающим, а какой второстепенным. Принимают константы подобия по главному решающему критерию, а второстепенный — учитывают на основе анализа его влияния, внося «масштабные поправки», переходят к приближенному моделированию. Сопоставление данных лабораторных исследований с натурными имеет решающее значение при оценке принятого пути.

Критерии подобия можно установить из условия тождественности дифференциальных уравнений, описывающих рассматриваемый процесс. В этом случае должны быть выполнены следующие условия: явления описываются аналогичными дифференциальными уравнениями; имеются подобные условия однозначности, куда входят геометрические свойства системы, то есть должно быть выполнено геометрическое подобие, граничные и начальные условия, а также существенные физические константы; должны быть одинаковые критерии подобия, составленные из величин, входящих в условия однозначности.

Понятие о критериальных уравнениях и автомодельности. После установления путем анализа дифференциальных уравнений, описывающих данный процесс, или из рассмотрения существа данного процесса, от каких безразмерных критериев подобия он может зависеть, отыскивают соответствующую зависимость между этими критериями, то есть получают *критериальное уравнение* или критериальную зависимость. Вместо отыскания теоретического решения дифференциальных уравнений (обычно это очень трудная задача) критериальную зависимость решают экспериментально, то есть моделированием.

Если какой-то из рассматриваемых критериев в некоторой области перестает оказывать влияние на исследуемую величину (например, Re на Eu или др.), то в этом случае принято считать, что наступила *область автомодельности* (в данном случае автомодельность по Re). Это позволяет упростить моделирование, так как этот критерий выпадает из рассмотрения. В отношении числа Рейнольдса при гидравлическом моделировании это в ряде случаев справедливо при $Re > Re_{гр}$, то есть когда оно больше некоторого граничного $Re_{гр}$.

12.1.3. ГИДРАВЛИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

Критерии подобия и значение их для различных случаев. При моделировании гидравлических явлений в общей постановке необходимо учитывать такие безразмерные параметры, как

Fr, Re, Eu, Sh (иногда и We). Существенное значение для многих задач гидравлики может иметь относительная шероховатость k/R (где k — абсолютная шероховатость; R — гидравлический радиус), а для высокотурбулентных потоков — число Кармана-Ка — критерий турбулентности $Ka = v'/v = idem$ (где v' — пульсационная составляющая скорости, среднее квадратичное отклонение, например; v — скорость, осредненная по времени). Этот критерий должен быть одинаковым для природы и модели. Общий вид критериального уравнения для гидравлических процессов (на жестких моделях, без рассмотрения размыва русла и транспорта наносов) имеет вид

$$\varphi(Fr, Re, Eu, We, Sh, Ka, k/R) = 0. \quad (12.7)$$

Некоторые критерии в силу их малой значимости выпадают, то есть их можно не учитывать. Так, число Струхала Sh используют только при рассмотрении неустановившихся течений или пульсационных характеристик. Число Вебера We в большинстве случаев учитывать вообще необязательно, то есть часто при моделировании не возникает необходимость в условии $We = idem$.

В практике моделирования часто не пытаются жестко соблюдать условие $Ka = idem$, хотя при моделировании турбулентных потоков оно должно учитываться. Это связано с трудностью реализации этого условия. При соблюдении других условий, например $Re > Re_{кр}$, на крупномасштабных моделях условие $Ka = idem$ обычно выполняется с приемлемым для практических целей приближением. В некоторых случаях (исследование местных сопротивлений, коротких участков сооружений в виде оголовков водосливов и др., зоны небольшого протяжения сильнотурбулизованного потока, то есть области гидравлического прыжка) можно не учитывать относительную шероховатость $k/R = idem$. При исследованиях на напорных установках установившихся течений обеспечивается автомодельность по Фруду и критерий Fr также можно не учитывать. В этом случае критериальное уравнение принимает вид

$$\varphi(Re, Eu, k/R) = 0. \quad (12.9')$$

При моделировании потоков со свободной поверхностью: гидроузлов, открытых русл, отдельных сооружений с прилегающими участками бьефов — выполнение критерия $Fr = idem$ является основным принципом моделирования.

Понятие о масштабных сериях. При исследованиях нескольких геометрически подобных моделей разных масштабов полученные характеристики в опытах экстраполируются на природу. Это так называемые масштабные серии. Эти данные позволяют внести масштабные поправки в характеристики, которые полу-

чились на небольших моделях, где не обеспечивалась автомодельность по критерию Рейнольдса. Такой путь исследований дает положительные результаты при работе с напорными водами, водосливами и другими сооружениями.

Масштабные поправки устанавливают от того размерного критерия, который характеризует силы, являющиеся следующими по значимости для данного явления по отношению к основному. Например, основным критерием является число Fg (гравитационные силы), вспомогательным, следующим по значимости, может быть Re или We .

О моделировании шероховатости. В связи с трудностями моделирования шероховатости оно (моделирование) может осуществляться с помощью вспомогательных графиков или расчетной зависимости Шези для коэффициента C . Так, $\alpha_v = v/v_1$,

$$v = C \sqrt{Ri} \quad \alpha_v = C \sqrt{Ri_1} \sqrt{C_1} \sqrt{R_1 i_1} = C \sqrt{\alpha_L},$$

так как при геометрическом подобии $i = i_1$. С другой стороны, при моделировании по Фрудру имеем

$$\alpha_v = \sqrt{\alpha_L}.$$

Приравнивая правые части обоих выражений, получим

$$C/C_1 \sqrt{\alpha_L} = \sqrt{\alpha_L},$$

тогда $C = C_1$.

Если показатель степени при R по Маннингу равен $1/6$, то имеем $C = (1/n)R^{1/6}$ — для натуре и $C_1 = (1/n_1)R_1^{1/6}$ — для моделей.

После деления первого равенства на второе получим

$$\alpha_n = n/n_1 = \alpha_L^{1/6}.$$

Есть данные по ориентировочным значениям коэффициентов шероховатости n и абсолютной шероховатости k для материалов, используемых в моделировании (стекло, оргстекло, строганое дерево, затертый бетон и др.).

Искажение масштабов применяют при исследовании на моделях участков рек большой протяженности. Без искажения масштабов модель получается с малыми глубинами и даже бывает $Re < Re_{гр}$, что недопустимо, часто трудно промоделировать шероховатость. Тогда принимают вертикальный масштаб крупнее планового, то есть $\alpha_L > \alpha_n$, в 5...10 раз, иногда в 20. При этом должно $i_1 > i$. Результаты приближенного моделирования можно использовать для переноса в натуре, но с определенной осторожностью.

12.1.4. МОДЕЛИРОВАНИЕ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ И ПРОЧНОСТИ ГТС

Задачи моделирования и методика экспериментов. При исследовании напряженного состояния и прочности ГТС и их оснований определяют напряжения, деформации и перемещения; оценивают коэффициенты запаса прочности и устойчивости, характер разрушения.

Ниже перечислены методы, применяемые наиболее часто для решения этих задач.

Метод исследования на хрупких моделях позволяет изучать работу сооружения как в упругой стадии, так и в стадии разрушения с оценкой коэффициента запаса, а также дает возможность использовать крупномасштабные модели с детализацией трещиноватости, блочности и слоистости оснований (геомеханические модели).

Метод фотоупругости дает возможность получения поля напряжений и более точные данные о концентрациях напряжений.

Метод электроаналогий позволяет работать без дорогих моделей и стендов при осуществлении автоматизации.

Условия расширенного механического подобия. Для твердых деформируемых тел их можно записать в следующем виде: $L/L_1 = \alpha_L$; $\sigma/\sigma_1 = \alpha_\sigma$; $\varepsilon/\varepsilon_1 = \alpha_\varepsilon$; $t/t_1 = \alpha_t$ и $\gamma/\gamma_1 = \alpha_\gamma$, где α, α_1 — соответствующие масштабные коэффициенты; L, L_1 — линейные размеры натуре и модели; σ, σ_1 — напряжения; $\varepsilon, \varepsilon_1$ — деформации; t, t_1 — время и γ, γ_1 — объемные массы.

Соблюдение первого соотношения легко осуществимо, а второе и третье возможны при подобии индикаторных диаграмм $\sigma = f(\varepsilon)$ (рис. 12.2, а). Индикаторные диаграммы подобны, если в сходных точках (точках со сходным напряженным состоянием, например 4 и 4', где напряжения равны $0,5 R_{\text{прizm}}$) между напряжениями и деформациями существуют соотношения α_σ и α_ε . Рассмотренный случай (рис. 12.2, б) относится к примеру *аффинного подобия*, при котором $\varepsilon/\varepsilon_1 \neq 1$; при $\varepsilon/\varepsilon_1 = 1$ (рис. 12.2, в) — *строгое подобие*; при $\alpha_\sigma = \alpha_\varepsilon = \alpha_\gamma$ имеем *простое подобие*: модель и натура созданы из одного материала и индикаторные диаграммы совпадают. Из второго и третьего соотношений для упругих материалов, подчиняющихся закону Гука $\sigma = E\varepsilon$, следует, что модель упругости и коэффициент Пуассона связаны соотношением $E = (\alpha_\sigma/\alpha_\varepsilon)E_1$. $G = (\alpha_\sigma/\alpha_\varepsilon)G_1$; $\gamma = \gamma_1$, где G — модуль сдвига. Индикаторная диаграмма, показанная на рисунке 12.2, г, предназначена для упругих материалов в случае строгого подобия ($\alpha_\varepsilon = 1$ и $\alpha_\sigma = \alpha_E$).

Нагрузки, прикладываемые к модели плотины и основанию (гидростатическое давление, собственный вес и др.), определяют на основе теории подобия, исходя из интенсивности гидро-

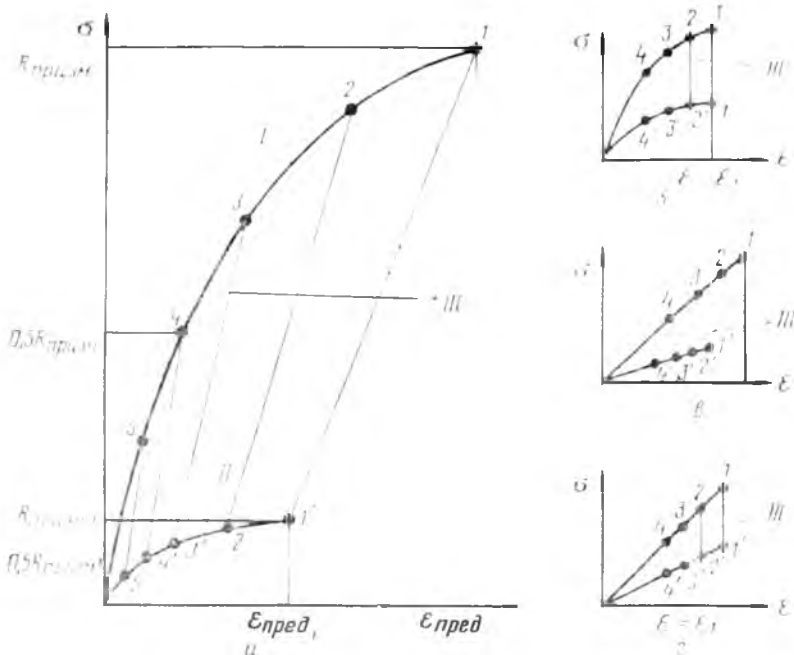


Рис. 12.2. Типы подобных индикаторных диаграмм:

а — общий случай подобия; б — строгое подобие; в — подобие индикаторных диаграмм материалов, описываемых законом Гука; 2 — строгое подобие индикаторных диаграмм материалов, описываемых законом Гука; I и II — индикаторные диаграммы соответственно натуре и модели; III — линии сходственных напряжений

статической нагрузки ($\sigma = \gamma h$, где h — глубина воды, м) или собственного веса. Для сходных точек подобных индикаторных диаграмм: $\sigma = E\epsilon$; $E = d\sigma/d\epsilon$; $E_1 = d\sigma_1/d\epsilon_1$.

С учетом приведенных соотношений

$$\begin{aligned} \gamma h / \gamma_1 h_1 &= \sigma / \sigma_1 = \alpha_\sigma, \\ h / h_1 &= L' L_1 = \alpha_L, \end{aligned} \quad (12.10)$$

где γ и γ_1 — удельный вес загрузочной жидкости или материала плотины соответственно для натуре и модели, Н/м^3 (например, $\gamma_{\text{воды}} = 10^5 \text{ Н/м}^3$, $\gamma_{\text{бетона}} = 2.4 \cdot 10^5 \text{ Н/м}^3$).

Из соотношений (12.10) $\gamma_1 = \gamma \alpha_L / \alpha_\sigma$; при строгом подобии $\gamma_1 = \gamma \alpha_L / \alpha_E$. Соотношение сил натуре и модели, полученные из формулы (12.10), $P/P_1 = (\sigma L^2) / (\sigma_1 L_1^2) = \alpha_\sigma \alpha_L^2$; при строгом подобии $P/P_1 = \alpha_E \alpha_L$, аналогично $P/P_1 = (\gamma L^3) / (\gamma_1 L_1^3) = \alpha_\gamma \alpha_L^3$.

Напряжения и деформации после замера на модели напряжений и деформации пересчитывают по зависимостям

$$\sigma = \alpha_\sigma \sigma_1; \quad \epsilon = \alpha_\epsilon \epsilon_1,$$

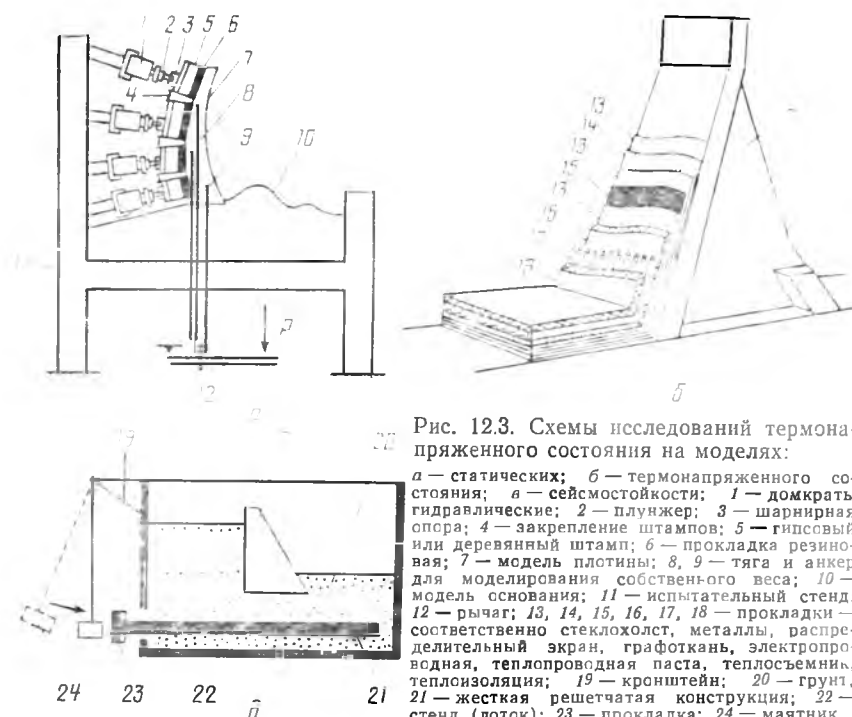


Рис. 12.3. Схемы исследований термонапряженного состояния на моделях:

а — статических; б — термонапряженного состояния; в — сейсмостойкости; 1 — домкраты гидравлические; 2 — плунжер; 3 — шарнирная опора; 4 — закрепление штампов; 5 — гипсовый или деревянный штамп; 6 — прокладка резиновая; 7 — модель плотины; 8, 9 — тяга и анкер для моделирования собственного веса; 10 — модель основания; 11 — испытательный стенд; 12 — рычаг; 13, 14, 15, 16, 17, 18 — прокладки — соответственно стеклохолст, металлы, распределительный экран, графитовые, электропроводная, теплопроводная паста, теплоотъемный, теплоизоляция; 19 — кронштейн; 20 — грунт; 21 — жесткая решетчатая конструкция; 22 — стенд (лоток); 23 — прокладка; 24 — маятник

а перемещения — по зависимостям $U/U_1 = \varepsilon L / \varepsilon_1 L_1$; $U = \alpha_L U_1$. При строгом подобии — $U = \alpha_L U_1$, где U и U_1 — перемещения соответственно натуре и модели.

Коэффициент запаса прочности и устойчивости комплекса сооружения — основание в стадии разрушения — оценивают по коэффициенту запаса $K = P_{\text{раз}} / P_{\text{экс}} = P_{\text{раз } 1} / P_{\text{экс } 1} = \gamma_{\text{раз}} / \gamma_{\text{экс}} = \gamma_{\text{раз } 1} / \gamma_{\text{экс } 1}$, где $P_{\text{раз}}$ и $P_{\text{раз } 1}$ — нагрузка, при которой происходит разрушение или потеря устойчивости соответственно натуре и модели; $P_{\text{экс}}$ и $P_{\text{экс } 1}$ — эксплуатационная нагрузка также соответственно натуре и модели; $\gamma_{\text{экс } 1}$ и $\gamma_{\text{раз } 1}$ — удельный вес загрузочной жидкости на модели соответственно для нагрузок расчетной эксплуатационной и разрушающей, Н/м³; $\gamma_{\text{экс}}$ и $\gamma_{\text{раз}}$ — тоже для натуре, Н/м³.

Моделирование динамических и сейсмических воздействий. Модельные исследования напряженного состояния и прочности при динамических воздействиях включают определение напряжений σ , деформаций ε , перемещений, то есть амплитуд U , периода свободных колебаний T , скоростей v и ускорений a . Для масштабных коэффициентов и пересчета с модели на натуре используют справочные данные.

Аналогично ведут моделирование напряжений, возникающих в гидротехнических сооружениях *под воздействием температур*. Решают температурную задачу и задачу термонапряженного состояния. Для моделирования используют критерии: Фурье $Fo = a_0 T / L^2$; Био $Bi = a_n L / \lambda$ и Дамкелера $D = q L^2 / (\lambda t)$, где a_0 — температуропроводность; λ — теплопроводность; q — количество тепла, приходящегося на единицу объема в единицу времени; t — температура натуры.

Если пренебречь тепловым сопротивлением и принять температуру на поверхности натуры и модели равной температуре внешней среды ($a_n = a_{n1} \approx \infty$), то в эксплуатационном периоде достаточно выполнения критерия Фурье.

Моделирование напряжений и деформаций и пересчет на натуру ведут по зависимости

$$\varepsilon / \varepsilon_1 = (\alpha t) / (\alpha_1 t_1) = \alpha_e, \quad (12.11)$$

где α и α_1 — коэффициенты линейного теплового расширения материала соответственно натуры и модели; t_1 — температура модели.

Масштаб времени определяют из критерия Фурье $\alpha_T = \alpha_L^2 / \alpha_{a_0}$, масштаб коэффициента — $\alpha_n / \alpha_{n1} = \alpha_n / \lambda_L$, а масштаб температур — из выражения (12.11). Схемы моделей представлены на рисунке 12.3.

12.2. НАТУРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ГТС

12.2.1. ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Цель натурных исследований: контроль за состоянием сооружений в период строительства и в начальный период эксплуатации; систематический контроль сооружений и оснований во время эксплуатации; проверка и анализ правильности принятых в расчете предпосылок, результатов расчетов и модельных исследований; предупреждение возникновения аварийных ситуаций и предварительное оповещение об этом; уточнение важных малоизученных явлений; исследование новых конструкций и типов плотин, трудно поддающихся расчету и новой технологии возведения сооружений, и, как следствие, — совершенствование методов расчета.

Натурные исследования различают: *контрольные наблюдения и специальные исследования*.

Инструментальные натурные исследования выполняют для гидротехнических сооружений I, II, III классов (естественно, визуальные наблюдения также не исключают); при специаль-

ном обосновании их проводят для сооружений IV класса. Для низконапорных плотин обычно ограничиваются *визуальными осмотрами* с целью обнаружения отдельных дефектов: осадок (более расчетных), подвижек, оползней, выхода фильтрационных вод в НБ в неположенных местах (на откосах, вне дренажа и др.), размывов откосов, русла и т. п. Для плотин из грунтовых материалов контрольные наблюдения ведут за состоянием креплений, деформациями откосов, гребня, кюветов, за размывами откосов и берегов, наледями, зарастанием и заилением дренажных устройств.

Наблюдения за сооружениями как в период возведения, так и эксплуатации проводят с помощью *контрольно-измерительной аппаратуры* (КИА), которую устанавливают в зависимости от назначения в грунте основания, на поверхности и внутри тела сооружения, на прилегающей к сооружению территории. КИА может быть закладной (стационарной), устанавливаемой в основание или тело сооружения в процессе его строительства, и съемной, устанавливаемой на поверхности сооружения или в скважинах, колодцах, потернах. Закладные приборы бывают большей частью дистанционного действия, их показания посредством кабеля передаются на прибор-приемник, размещенный в доступном месте.

Подготовка и выполнение натурных исследований — это сложный комплекс работ, включающий: выполнение проекта натурных исследований; разработку конструкций КИА и изготовление приборов; установку КИА в сооружение и организацию наблюдений; обработку и анализ полученных данных наблюдений.

12.2.2. ВИДЫ НАТУРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ И КОНТРОЛЬНО-ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ АППАРАТУРА

Контроль качества материалов при строительстве. Для *плотин из грунтовых материалов* качество материала контролируют отбором проб из карьеров и тела плотины, определяя плотность, влажность, удельный вес, границы пластичности глинистого грунта, коэффициент фильтрации, гранулометрический состав, сдвиговые характеристики, деформационные свойства. Имеются экспресс-методы по оценке плотности и влажности грунта.

Для *бетонных плотин* исследуют технологию их производства. Отбирают пробы для определения прочности, деформирования и теплофизических свойств бетона; изучают теплозащитные свойства опалубки, температурный режим блоков с учетом мероприятий его регулирования, температурные напряжения,

раскрытие швов (строительных и конструктивных); оценивают трещинообразование в блоках и качество цементации. Затем наблюдают за работой сооружения: исследование осадок, деформаций блоков и основания; горизонтальных перемещений, контактных напряжений в плотинах на нескальных основаниях и напряжений в анкерных понурах.

Ответственный этап, связанный с начальной оценкой работы сооружения, — это наполнение водохранилища, когда ведут большой объем исследований.

Натурные исследования гидравлики сооружений. Их проводят в период эксплуатации для оперативного контроля состояния водопропускных сооружений, берегов НБ, ложа реки. Исследования осуществляют при пропуске расходов для различных режимов, изучая: колебания уровней воды обоих бьефов, гидравлический режим, растекание потока в плане, скорости по глубине потока, вибрацию, кавитацию, эрозию элементов конструкций, аэрацию потока, гидродинамическое давление, динамические напряжения и деформации, пропускную способность сооружений. Для корректировки режимов работы, кроме обычных контрольных наблюдений и специальных исследований при вводе сооружения в эксплуатацию (постоянную или временную), проводят пусковые испытания, а после пропуска воды — визуальные обследования и промеры глубин.

Схема сооружения с размещением на нем приборов представлена на рисунке 12.4.

Исследования фильтрации. Натурные исследования фильтрации заключаются: в установлении положения кривой депрессии в грунтовых плотинах, определении фильтрационного расхода и давления фильтрационного потока в некоторых точках области фильтрации; для бетонных плотин особое значение имеет определение давления фильтрационного потока на подошву плотины, градиентов и скоростей в сооружении и его основании с целью оценки возможности механической и химической суффозии.

Положение депрессионной кривой и фильтрационное давление определяют пьезометрами (рис. 12.5) и пьезодинамометрами, а фильтрационный расход — или объемным способом, или с помощью мерных водосливов, установленных в кюветах у подошвы низового откоса грунтовой плотины, или в кюветах галерей бетонной плотины. Скорость фильтрации вычисляют солевым методом, методом красителей и др.

Натурные исследования перемещений. Перемещения бывают вертикальные (осадки), горизонтальные и наклонные.

Вертикальные перемещения определяют с помощью геометрического, тригонометрического и гидростатического нивелирования.

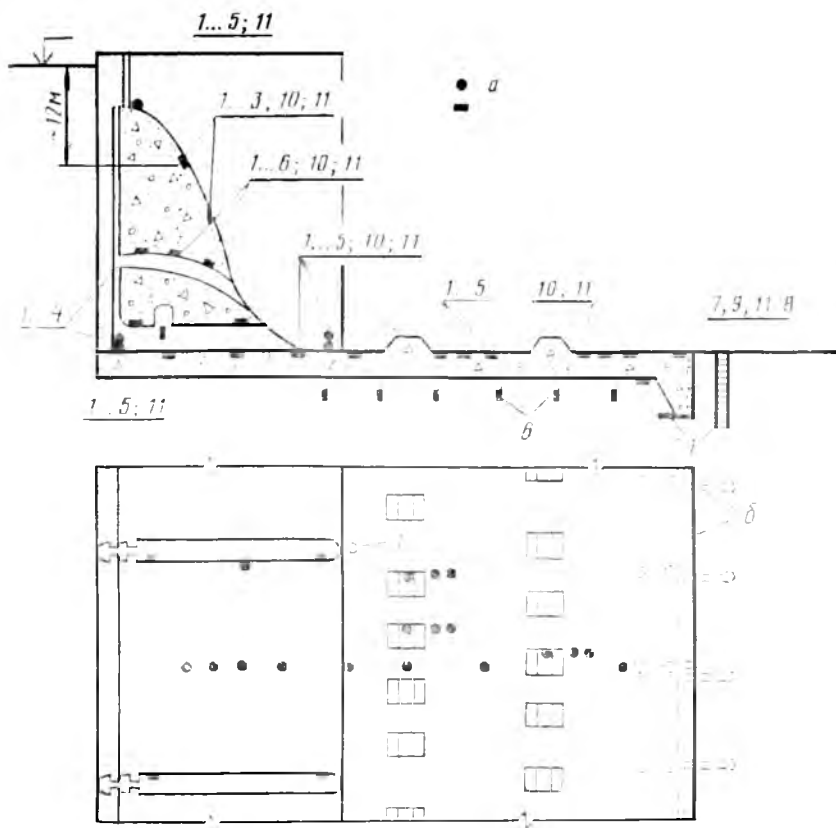


Рис. 12.4. Схема размещения приборов на плотине и виды гидравлических исследований:

а — измерительные точки; б — кабельные линии систем наблюдения за разрывом; в — анкеры с датчиками динамических напряжений; 1 — гидродинамическое давление; 2 — кавитация; 3 — эрозия; 4 — вибрация; 5 — динамические напряжения; 6 — контакт облицовки со стенкой водовода; 7 — размыв дна и берегов; 8 — подмыв; 9 — растекание в плане и скорости; 10 — аэрация; 11 — визуальные наблюдения

Абсолютные горизонтальные перемещения вычисляют створными, триангуляционными и комбинированными методами (рис. 12.6).

Относительные горизонтальные перемещения находят с помощью отвесов прямого или обратного, иногда и того и другого.

Наклоны сооружений определяют либо с помощью гидроstaticеского и геометрического нивелирования марок напорной и низовой граней плотины, либо дистанционными клинометрами, установленными на сооружении.

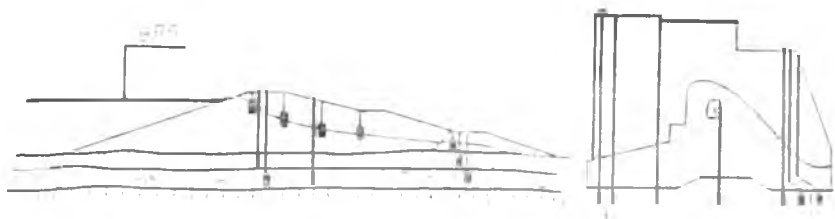


Рис. 12.5. Схемы размещения пьезометров на плотинах:

а — грунтовая плотина; б — бетонная плотина на скальном основании; 1, 2 — верхний шпунт

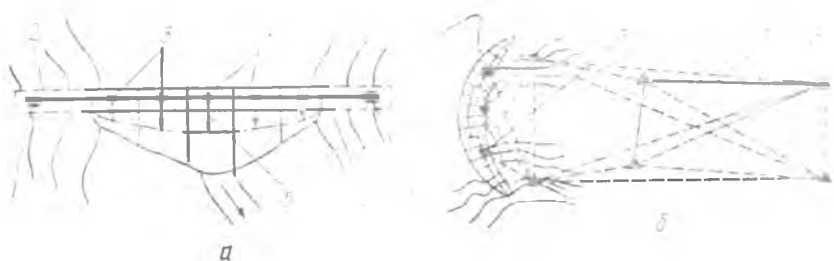


Рис. 12.6. Измерение горизонтальных перемещений (смещений):

а — створным методом; б — методом триангуляции; 1, 8 — опорные пункты на лицах створа и берегах; 2 — штольня; 3, 6 — контрольные пункты и точки; 4 — секции пьезометров; 5 — горизонтальные смещения секций; 7 — базис

Взаимные перемещения частей бетонной плотины. Измеряют взаимное перемещение секций, столбов, раскрытие межсекционных и межстолбчатых (цементируемых) швов, швов-надрезов, горизонтальные строительные швы на обеих гранях, контактный шов под напорной гранью щелемерами (одно-, двух- и трехосными).

Натурные исследования деформаций и напряжений в теле сооружений, в основании и арматуре. В сооружении определяют напряжения и деформации: напряжения по подошве, деформации скалы (в основании и бортовых примыканиях), напряжения в арматуре, температуру бетона и основания, поровое давление (в грунте и бетоне), основные нагрузки и воздействия (собственный вес плотины, уровни в бьефах, температура воды, водохранилища и воздуха). Напряжения измеряют двумя способами: *тензометрическим* (измеряют тензометрами относительные деформации и по ним на основе зависимостей — напряжения внутри сооружения и на поверхности), непосредственно датчиками напряжений.

Основное назначение натурных исследований — *обеспечение безопасности плотин*. Полная автоматизация исследований способствует быстрому решению этой задачи. Поэтому планируют: использование дистанционных датчиков с максимумом информации от них при их разумном минимуме; разработка и введение в строй комплексов вторичной приемной аппаратуры с автоматическим вызовом датчиков и записью их данных в форме, удобной для ЭВМ; разработка критериев безопасности и контрольных данных (по перемещениям, напряжениям, расходам фильтрации, температурным режимам и др.) для оперативного контроля за состоянием сооружений и сравнения с существующим положением с хорошей обратной связью и оповещением персонала в случае необходимости.

На относительно некрupных гидротехнических сооружениях с числом КИА 200... 300 единиц более экономичными являются неавтоматизированные системы контроля.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ

1. Какие задачи решают лабораторными исследованиями?
2. С какой целью проводят натурные исследования гидротехнических сооружений?
3. Сформулируйте основные представления о законах подобия.
4. Перечислите критерии подобия гидравлических явлений.
5. Расскажите о задачах и основных принципах исследований напряженного состояния и прочности гидросооружений.
6. Каковы принципы размещения контрольно-измерительной аппаратуры для натурных исследований?

НЕКОТОРЫЕ ПРОБЛЕМЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ВОДОХРАНИЛИЩ, ВОССТАНОВЛЕНИЯ И ОХРАНЫ МАЛЫХ РЕК

Водохранилища. В 50—60-е годы в связи с большими масштабами гидротехнического строительства — создания водохранилищ на Волге, Дону, Днепре, Ангаре, Оби, Иртыше и других реках — начали изучение влияния водохранилищ на окружающую среду. Перед учеными, проектировщиками, эксплуатационниками возник ряд проблем: прогноз переформирования берегов, всплывания торфяников, исследования последствий зарегулирования стока на ледовый, гидрохимический и гидробиологический режимы рек на условия воспроизводства и нагула проходных и полупроходных рыб. Изучение и прогнозирование изменения режимов грунтовых вод в прибрежной и отдаленной от водохранилищ зонах, влияния водохранилищ на почвы, климат, растительный и животный мир прилегающих террито-

рий, влияние мелководий на окружающую территорию и водохранилище. Определенный интерес представляют исследовательские работы в нижних бьефах гидроузлов, включая дельты рек и взморья. Широкое водохозяйственное строительство на малых реках, прудах, водоемах (особенно в Нечерноземной зоне европейской части РСФСР) также нуждается в широком научном обобщении, чтобы не усугубить экологическую обстановку прилегающих территорий.

При изъятии земель под водохранилища необходимо переселение большого числа людей, переустройство хозяйств.

Естественно, что все эти исследования выходят за пределы рассмотренных в учебнике лабораторных, натурных исследований гидротехнических сооружений.

Водоохранилища — это управляемые объекты, их основные параметры и характеристики (местоположение, объем, площадь зеркала, режим регулирования и др.), определяются на стадии изысканий и проектирования. В составе сооружений гидроузлов имеются системы и специальные устройства (водосбросы и водоспуски, гидротурбины), позволяющие изменять объем и уровни водохранилища. Главная особенность, связанная с эксплуатацией водохранилищ, — некоторая неопределенность, вытекающая из вероятностного (стохастического) характера направленности и интенсивности гидрометеорологических процессов на водосборном бассейне. Поэтому правы специалисты, предлагающие рассматривать водохранилища как природно-технические системы или комплексы, состоящие и из двух подсистем — природной и технической, взаимодействующих диалектически между собой. Здесь следует заметить, что водохранилища можно считать частично управляемыми системами, так как, управляя технической подсистемой, человек может вызвать развитие таких процессов и явлений в природной подсистеме, которые он предотвратить не в состоянии (либо это потребует значительных материальных и трудовых ресурсов). Иными словами, человек может управлять непосредственно только запасами воды, а экосистемой, геосистемой — частично и косвенно. Поэтому ставя задачу об активном участии специалистов, научных работников, работающих в гидротехнике, в изучении, разработке этой проблемы, необходимо иметь в виду, что конечная цель этих исследований (каждого специалиста в своей сфере) должна быть направлена на человека — все для человека, все на человека, на удовлетворение его широких духовных и материальных потребностей.

Особенности проведения исследований по восстановлению и охране малых рек. Согласно последней гидрографической инвентаризации (см. справочник «Реки и озера Советского Сою-

за», 1971) учтено 3 млн малых рек с их суммарной длиной более 24 млн км, а это — около 90% протяженности всех наших рек.

Большинство малых рек являются верхними звеньями крупных речных систем, однако имеются и исключения.

Реки покрывают густой сетью как равнинные, так и горные территории; они представляют собой области формирования ресурсов поверхностных вод и в известной степени определяют своеобразие состава воды и водных биоценозов, особенности гидрологического и биологического режимов средних и крупных рек, в которые они впадают. На их берегах проживает значительная часть сельского и городского населения, использующего воды рек для питьевого и хозяйственно-бытового водоснабжения, орошения близлежащих садов и огородов, купания и отдыха, туризма, рыбной ловли и охоты, а поймы — для выпаса скота и заготовки кормов. Поэтому их состояние волнует самые широкие круги как сельских, так и городских жителей.

Вследствие технического прогресса и резкого роста масштабов хозяйственной деятельности, особенно в последние десятилетия, проблема рационального использования водных, биологических и рекреационных процессов малых рек и их охраны резко обострилась.

Имеется немало примеров и за рубежом (где этой проблеме уделяется гораздо больше внимания, чем у нас), и в нашей стране, когда интенсивная хозяйственная деятельность сочетается с хорошим состоянием окультуренного ландшафта, с природными, разумно обустроенными комплексами, устойчивыми к неблагоприятным природным и антропогенным воздействиям, с сознательно эстетически усиленной привлекательностью. Парки, выдерживающие значительную рекреационную нагрузку в сравнении с естественными ландшафтами, участки судоходных рек и каналов, оснащенные удачными русловыправительными сооружениями, многочисленные пруды, городские и сельские, полезащитные и водозащитные сооружения и др. — могут служить тому примером.

Повышение устойчивости речных систем и увеличение их самоочищающей способности и рыбопродуктивности, как показывает мировой опыт, могут быть обеспечены не слишком трудоемкими и дорогостоящими мероприятиями; это в первую очередь относится к малым рекам.

Чтобы избежать неоправданных, а в ряде случаев и вредных для окружающей среды затрат и иметь гарантию ощутимого положительного эффекта от принятых водоохранных мероприятий, необходимы тщательно разработанные проекты, основанные на глубоких исследованиях не только гидротехническо-

го направления, но и гидрологических и биологических процессов. Эти исследования должны включать достаточно продолжительные полевые комплексные наблюдения на реках с всесторонней обработкой их результатов при применении методов статистического анализа; эксперименты как натурные, так и математическое моделирование явлений для разработок многовариантных прогностических и диагностических расчетов; проработку конкретных проектов с использованием полученных рекомендаций на основе предыдущего; научные экспертизы проектов и, наконец, не менее существенное, чем все ранее перечисленное, — это систематическое проведение наблюдений на преобразованных объектах после выполнения необходимых мелиоративных работ, что позволяет определить эффективность выполненных мероприятий.

Тщательная разработка научно обоснованных проектов без стремления к неоправданной экономии затрат средств на них может дать значительную экономию трудовых и материальных ресурсов при осуществлении водоохраных мероприятий.

Комплексность подхода к решению задачи восстановления нарушенных участков рек на базе тесного взаимодействия всех специалистов — гидрологов, инженеров, биологов, стремление получить результаты способами общедоступными, простыми и не самыми дорогими — таково основное направление решения поставленных задач.

Всестороннее обобщение отечественного опыта комплексных исследований на малых реках с целью изучения влияния регулирования стока на их режимы (водный, химический, биологический), на познание механизмов самоочищения малых рек, загрязняемых сточными водами, — все это необходимо принимать во внимание при проведении исследований.

Примерами комплексного подхода к рассматриваемой проблеме в нашей стране имеются. Многолетние исследования, проведенные на Верхней р. Москве и Можайском водохранилище, регулирующем ее сток (МГУ им. М. В. Ломоносова), на двух малых реках Латвии (Институт биологии АН Латвии), на реках Волжского бассейна (Ярославский государственный университет), на участках Верхнего Днестра (Белорусский государственный университет), и др., позволяют сделать вывод о том, что применительно к малым рекам равнинных территорий нашей страны возможно повышение устойчивости водных экосистем к неблагоприятным воздействиям и усиление их значения в процессе самоочищения путем оптимизации гидрологического и гидробиологического режимов малых рек.

В работе над этой важной проблемой советским ученым и специалистам поможет книга «Восстановление и охрана малых рек» (теория и практика), 1989 г., вышедшая в США.

ПРЕДМЕТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ

- Аванкамера 271
Акведук 46
Анкеровка 56, 280
Аппаратура контрольно-измерительная (КИА) 336
Арка 127, 129, 135
Армирование плотин 97
Асфальтобетон 74
- Берма 72
Бетон 103, 118
Бревноспуск 285
Буны 209
Бык 129, 143, 166, 173
Быстроток 59, 60
- Верхний бьеф 6
Взрыв направленный 96
Водобой 16, 139
Водовыпуск 150
Водозабор:
 бесплотинный 217
 плотинный 222
 с машинным подъемом 215
 инфильтрационный 231
Водоприемник 216, 270
Водосброс 131, 149, 151
Водослив:
 вакуумный 138
 безвакуумный 138
- Давление фильтрационное 13, 18, 110, 121, 141, 144, 186
Дамбы 196, 208, 209, 221, 225
Деформации:
 русловые 192
 фильтрационные 27, 142
Диафрагма 41, 89
Днище камеры шлюза 280, 281
Долина речная 189
Дренаж 34, 75, 109, 111, 142
Дюкер 51
- Емкость регулирующая 305
- Завеса цементационная 69, 108, 146
Заграждение ремонтное 164, 173
Заилиение:
 водохранилища 302
 отстойника 241
Заложение откосов 38
Занесение водохранилища 302, 305
Затворы:
 поверхностных отверстий 166
 глубинных отверстий 175
 трубопроводов 176
Зуб 26, 108
- Инъекционные завесы 69
Исследования:
 лабораторные 325
 натурные 335
- Кавитация 136, 256
Камень рваный 88
Камера:
 отстойника 235, 238, 240
 судоходного шлюза 279, 280
Канал 35, 222, 241, 243
Класс сооружений 7
Ковш 16, 17, 141
Колодец водобойный 68, 139
Компоновка гидроузла 261, 297, 319
Концевая часть рисбермы 17, 141
Контрфорс 101, 122
Контур подземный 17, 141
Коэффициент:
 расхода водослива 133
 фильтрации 15
 устойчивости 86, 104
Коэффициент Шези 331
Крепление:
 откосов 38, 72, 225
 нижнего бьефа 133, 139
Кривая депрессии 83, 146
Критерий:
 Ньютона 327
 подобия 326
Крупность гидравлическая 235

Линии:

- равных напоров 21
- токов 21
- Лотки лесосплавные 285
- Лоток 49, 51, 226

Макроформа 190

Меандрирование русл 191

- Метод круглоцилиндрических поверхностей скольжения 86
- Н. Н. Павловского 82
- УКЛ 24

Моделирование 329

— гидравлическое 329

Модуль упругости 114, 383

Морозостойкость 118

Мост служебный 264

Мощность принимаемого основания 23

Мутность потока 233, 301

Наброска каменная 89, 140

Наводнения 196, 300

Нагрузки:

- волновые 78
- длительные 13
- кратковременные 13
- расчетные 13

Надежность 132, 135

Накат волны 78

Наносы:

- взвешенные 216
- донные 216, 219

Напряжения:

- в теле плотины 105
- главные нормальные 105

Обвалование 196, 304

Обжатие профиля плотины 120

Область фильтрации 82, 85

Облицовка туннельная 55, 58

Оборудование гидротехнических сооружений механическое 163

Обшивка затвора 179

Объем водохранилища 298

Оголовки 53, 58, 123

Опорно-ходовые части 181

Осадка основания 88

Основание плотины 73

Отверстие водопропускное 132, 137

Откосы плотины 72

Отстойники 233

Парапет 72

Переезд 44

Перекрытие напорное контрфорсных плотин 122

Перемычки 315, 317

Перепад 62

Переработка берегов 302

Пленка полиэтиленовая 74

Плотины:

- арочные 128
- водосбросные 136
- гравитационные 103
- грунтовые 68
- деревянные 100
- контрфорсные 121
- каменно-земляные; каменно-набросные 88
- сланцевые 98
- тканевые 101

Плотоход 286

Подходы к судоходным шлюзам 278

Понур 17, 138, 142

Порталы:

- туннеля 58, 318
- затвора сегментного 166, 184
- Прочность фильтрационная 27, 141
- Профиль плотины 70, 104, 106
- Процесс русловый 189
- Пруды рыболовные 294
- Пути водные 277
- Пучение морозное 45

Работы выправительные 198

Размыв контактный 29

Размыв нижнего бьефа 135, 138

Разрезка плотин 113, 142

Расходы руслоформирующие 199

Расчет плотин 77

Регуляторы 40, 42

Ригели 179

Рисберма 16, 140

Русло:

- реки 190
- канала 36
- параболическое 36
- Рыбозащитные сооружения 291
- Рыбопропускные сооружения 288
- Рыбоподъемники 290
- Рыбоход 288
- Ряж 101

Сдвиг сооружения 104

Селепровод 48

Сетка гидродинамическая 21

Сечение:

- быстротока 60
- канала 36
- Скважина дренажная 110, 146
- Системы питания судоходных шлюзов 279, 280

- Скорость:
 - ветра 78
 - неразмывающая 37
 - незаиляющая 37
- Сооружения берегоукрепительные 195
- Сопряжение бьефов 133, 138
- Стадии проектирования 15, 16
- Стойка:
 - опорная 101
 - опорно-концевая 178
- Судоподъемники 283
- Суффозия:
 - механическая 27
 - химическая 27
- Течение вдольбереговое 302
- Тракт водосбросной 151, 153
- Транспортирующая способность потока 233
- Траншейный водосброс 154
- Трасса выправительная 197
- Труба-ливнепровод 52
- Туннель гидротехнический 53
- Угол отвода 221
- Уплотнения:
 - швов 117, 144
 - затворов 169, 182
- Уровень мертвого объема 298
- Устои плотин 146
- Устой береговой 101
- Устойчивость:
 - на сдвиг 104
 - откосов 86
- Устройства рыбозащитные 291, 294
- Фильтр обычный 291
- Фильтрация: 15
 - безнапорная 15
 - напорная 15
- Флютбет 16
- Хозяйство прудовое рыбоводное 294, 296
- Цементация основания 34, 107
- Циркуляция потока поперечная 210, 220
- Части водосброса 148, 160
- Число Рейнольдса 328
- Число Фруда 328
- Шахтные водосбросы 158
- Швы:
 - конструктивные постоянные 115
 - температурные 115, 143
 - строительные 115
 - расширенные 121
- Шероховатость 60
- Шлюз судоходный 277, 280
- Шпора 202, 210
- Шпунт 21, 142
- Экран:
 - грунтовый 69, 92
 - из негрунтовых материалов 69, 89, 121
- Элементы водопропускных сооружений 150
- Эпюра фильтрационного давления 17
- Эрозия кавитационная 136
- Ядро 69, 91

ОГЛАВЛЕНИЕ

<i>Введение</i>	3
Глава 1. Общие сведения о гидротехнических сооружениях	5
1.1. Цели и задачи гидротехники	5
1.2. Классификация гидротехнических сооружений	5
1.3. Особенности гидротехнических сооружений	10
1.4. Гидроузлы и гидросистемы	12
1.5. Общие сведения о проектировании гидротехнических сооружений	13
1.6. Стадии и виды проектирования, нормативные документы	
Глава 2. Фильтрация в основаниях гидротехнических сооружений и в обход их	15
2.1. Фильтрация в нескальных основаниях	15
2.1.1. Общие сведения о фильтрации	15
2.1.2. Флютбет и его составные части	16
2.1.3. Предпосылки фильтрационных расчетов	17
2.1.4. Методы фильтрационных расчетов	19
2.1.5. Метод коэффициентов сопротивлений	22
2.1.6. Некоторые другие методы расчетов и особые случаи	24
2.1.7. Влияние на фильтрацию отдельных элементов флютбета	26
2.1.8. Фильтрационные деформации грунтов основания	27
2.2. Фильтрация в свободных поровых средах	28
2.3. Фильтрация в скальных основаниях	32
2.3.1. Особенности фильтрации в скальных породах	32
2.3.2. Фильтрационное противодействие и противофильтрационные мероприятия в основаниях плотин	33
Глава 3. Каналы и сооружения на них	35
3.1. Общие сведения о каналах	35
3.2. Облицовка и одежда каналов	37
3.3. Сооружения на каналах	39
3.3.1. Регулирующие сооружения	40
3.3.2. Водопроводящие сооружения	46
3.3.3. Сопрягающие сооружения	59
Глава 4. Плотины	68
4.1. Плотины из грунтовых и других местных материалов	68
4.1.1. Общие сведения о грунтовых плотинах	68

412	Краткая характеристика грунтов тела плотины и основания	70
413	Конструкции элементов плотин	71
414	Расчет и проектирование плотин из грунтовых материалов	77
42	Каменно-набросные и каменно-земляные плотины	88
421	Каменно-набросные плотины	88
422	Каменно-земляные плотины	90
43	Намывные плотины	93
44	Плотины прочих типов из грунтов, дерева, тканей	96
45	Бетонные гравитационные плотины	103
451	Теоретический экономический поперечный профиль	104
452	Реальные профили плотин	106
453	Разрезка плотин швами	113
454	Способы снижения стоимости гравитационных плотин	117
46	Контрфорсные плотины	121
461	Устройство, классификация и условия применения	121
462	Массивно-контрфорсные плотины	123
463	Плотины с плоскими перекрытиями	126
464	Многоарочные плотины	126
47	Арочные плотины	128
48	Водосбросы в теле бетонных плотин на скальных основаниях	131
49	Бетонные плотины на нескальных основаниях	136
491	Назначение и основные типы водосборочных плотин	136
492	Типы водосливных профилей	138
493	Сопряжение потока с НБ	138
494	Подземный контур плотин	141
495	Разрезка бетонных плотин на нескальных основаниях	142
410	Сопряжение бетонных плотин с берегами и грунтовыми плотинами	144

Глава 5	Водопропускные сооружения гидроузлов с глухими плотинами	147
51	Основные типы сооружений и условия их применения	147
52	Береговые открытые водосбросы	151
521	Водосбросы с лобовым подводом воды (фронтальные)	151
522	Водосбросы с боковым подводом воды (траншейные)	154
53	Закрытые береговые водосбросы	156
531	Трубчатые оашенные водосбросы	156
532	Трубчатые ковшовые водосбросы	157
533	Сифонные водосбросы	157
534	Шахтные водосбросы	158
535	Туннельные водосбросы	159
54	Водовыпуски	161
541	Трубчатые водовыпуски	161
542	Туннельные водовыпуски	162

Глава 6	Затворы гидротехнических сооружений	163
61	Понятие о механическом оборудовании гидросооружений	163
62	Классификация затворов	164
63	Затворы глубинных отверстий	175
64	Плоские затворы гидросооружений	178
641	Пролетное строение и схемы устройства балочной клетки	179
642	Опорно-ходовые части затворов	181

643	Устройство уплотнений	182
644	Особые конструкции плоских затворов	183
65	Сегментные затворы	184
66	Нагрузки и воздействия на затворы	185
67	Определение усилий для маневрирования плоским и сегментными затворами	186
Глава 7	Регулирование русл рек и регулирующие сооружения	189
71	Русловой процесс	189
711	Русловой процесс — взаимодействие наносонесущего потока с руслом	189
712	Устойчивость русл рек. Классификация	190
713	Основные виды деформации русл и их прогнозирование	192
72	Методы регулирования русл	193
721	Некоторые общие методы регулирования русл	193
722	Общее регулирование русла или выправительные работы	197
723	Некоторые специальные вопросы регулирования русл	199
73	Регуляционные сооружения	206
731	Строительные материалы и элементы, конструкции	206
732	Основные конструкции сооружений	208
Глава 8	Водозаборы и отстойники	211
81	Водозаборные сооружения, классификация и основные требования к водозаборам	211
811	Водозаборы в составе водохранилищных гидроузлов	212
812	Речные водозаборы	216
813	Самотечные бесплотинные водозаборы	217
814	Способы борьбы с вовлечением донных наносов	219
815	Плотинные водозаборы	222
816	Состав сооружений и компоновка плотинного водозаборного гидроузла	223
817	Способы борьбы с наносами, конструктивные схемы поверхностных водозаборов	226
818	Глубинные решетчатые водозаборы	230
819	Фильтрационные (инфильтрационные) водозаборы	231
82	Отстойники	233
821	Назначение и классификация отстойников	233
822	Принцип устройства и схема работы отстойника периодического действия с гидравлической промывкой	235
823	Принцип устройства и схема работы отстойника непрерывного действия	238
824	Отстойники мелиоративных систем (ирригационные)	240
Глава 9	Насосные станции и гидротехнические узлы машинного водоподъема	242
91	Назначение и классификация. Состав узла с машинным подъемом воды	242
92	Классификация и основные параметры насосов	244
93	Принцип действия и характеристики лопастных насосов	247
931	Принцип действия центробежного насоса	247
932	Основные характеристики центробежных насосов	249
933	Принцип действия осевых насосов	251
94	Устройство некоторых видов динамических лопастных насосов	252
95	Насосные установки и их основные параметры	254
951	Кавитация в насосах. Допустимая высота всасывания насосной установки	256

9.6.	Определение основных расчетных параметров насосов насосных станций. Регулирование работы насосов . . .	257
9.6.1.	Понятие расчетной подачи и расчетного напора . . .	257
9.6.2.	Регулирование работы насосов . . .	259
9.6.3.	Параллельная и последовательная работа насосов . . .	260
9.7.	Состав и компоновка сооружений узлов машинного водоподъема . . .	261
9.7.1.	Компоновка узлов оросительных систем с забором воды из рек и водохранилищ . . .	262
9.7.2.	Компоновка узлов оросительных систем с забором воды из каналов . . .	265
9.7.3.	Компоновка узлов осушительных систем . . .	265
9.8.	Устройство узлов машинного водоподъема . . .	267
9.8.1.	Водозаборные, транспортирующие и водоприемные сооружения . . .	268
9.8.2.	Насосные станции . . .	271
9.8.3.	Напорные трубопроводы и водовыпускные сооружения . . .	273

Глава 10. Судопропускные, лесопропускные, рыбопропускные и рыбозащитные сооружения 277

10.1.	Судопропускные сооружения	277
10.1.1.	Основные понятия о водных путях	277
10.1.2.	Судоходные шлюзы	277
10.1.3.	Пропуск караванов или отдельных судов через шлюз . . .	282
10.1.4.	Судоподъемники	283
10.2.	Лесопропускные сооружения	284
10.3.	Рыбохозяйственные гидротехнические сооружения . . .	287
10.3.1.	Влияние гидротехнического строительства на запасы рыбы . . .	287
10.3.2.	Рыбопропускные сооружения	288
10.3.3.	Рыбозащитные сооружения	291
10.3.4.	Рыбоводные пруды	294

Глава 11. Водохранилища и подпертые бьефы. Компоновки речных гидроузлов 297

11.1.	Водоохранилища, подпертые бьефы и НБ гидроузлов . . .	298
11.1.1.	Общие сведения о водохранилищах, их характеристики . . .	298
11.1.2.	Влияние водохранилищ и подпертых бьефов на гидрологический режим водотока . . .	300
11.1.3.	Режим движения наносов в ВБ и НБ гидроузлов . . .	301
11.1.4.	Переработка берегов в ВБ и НБ	302
11.1.5.	Инженерные мероприятия по уменьшению ущерба от затопления и подтопления земель при создании водохранилищ . . .	304
11.1.6.	Температурно-солевой и ледовый режимы водотока в районе водохранилища . . .	307
11.1.7.	Изменение биологического режима рек после создания водохранилищ . . .	307
11.1.8.	Влияние водохранилищ на природно-климатические условия района строительства . . .	308
11.1.9.	Мероприятия по подготовке ложа водохранилища . . .	309
11.2.	Компоновка речных гидроузлов	310
11.2.1.	Основные требования к компоновкам	311
11.2.2.	Схемы организации пропуска расходов реки в период строительства гидроузлов . . .	313
11.2.3.	Компоновки сооружений в низконапорных гидроузлах . . .	319

11.2.4.	Компоновки средненапорных гидроузлов	326
11.2.5.	Компоновки высоконапорных гидроузлов	328
Глава 12.	Исследования гидротехнических сооружений	324
12.1.	Лабораторные исследования ГТС	324
12.1.1.	Задачи исследований, их основные виды	324
12.1.2.	Основные представления о теории подобия	325
12.1.3.	Гидравлическое моделирование	329
12.1.4.	Моделирование напряженного состояния и прочности ГТС	332
12.2.	Натурные исследования ГТС	335
12.2.1.	Основные положения	335
12.2.2.	Виды натурных исследований и контрольно-измерительная аппаратура	336
	Некоторые проблемы исследования водохранилищ, восстановления и охраны малых рек	340
<i>Предметный указатель</i>		344

Учебное издание

**БАХТИН БРОНИСЛАВ МИХАЙЛОВИЧ,
КОРЮКИН СЕРГЕЙ НИКАНДРОВИЧ**

ГИДРОТЕХНИЧЕСКИЕ СООРУЖЕНИЯ

Учебное пособие для вузов

Зав. редакцией **А. И. Гераськина**

Художественный редактор **К. И. Мацегорин**

Технический редактор **Н. В. Суржева**

Корректор **М. В. Чаплыгина**

ИБ № 5396

Сдано в набор 04.04.91. Подписано к печати 03.07.91. Формат 60×88¹/₁₆.
Бумага кн.-журн. Гарнитура Литературная. Печать офсетная. Усл. печ. л. 21,56.
Усл. кр.-отт. 21,56. Уч.-изд. л. 22,89. Изд. № 438. Тираж 3000 экз. Заказ № 898.
Цена 1 р. 30 к.

Ордена Трудового Красного Знамени ВО «Агропромиздат», 107807, ГСП-6,
Москва, Б-78, ул. Садовая-Спасская, 18.

Московская типография № 11. 113105, Москва, Нагатинская ул., д. 1.