

## Оглавление

ВВЕДЕНИЕ .....	5
1. ВОДОСБРОСНЫЕ СООРУЖЕНИЯ В СОСТАВЕ ГИДРОТЕХНИЧЕСКИХ УЗЛОВ.....	6
1.1. Типы водосбросных сооружений.....	6
1.2. Способы и устройства для гашения кинетической энергии потоков .....	10
1.3. Гидродинамические воздействия сбросных потоков на строительные конструкции водосбросов .....	16
2. ВОДОСБРОСЫ С ЗАКРУТКОЙ ПОТОКА .....	18
2.1. Эффекты закрутки потока применительно к водосбросным системам .....	18
2.2. Головная и концевая схемы водосброса с закруткой потока .....	20
2.3. Конструкции проточной части водосбросов с контрвихревыми гасителями энергии .....	23
3. ГИДРАВЛИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ ВОДОСБРОСНЫХ СИСТЕМ С КОНТРВИХРЕВЫМИ ГАСИТЕЛЯМИ КИНЕТИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ .....	30
3.1. Пример алгоритма графоаналитического расчета контрвихревого гасителя кинетической энергии потока с цилиндрическими локальными завихрителями.....	30
Библиографический список .....	36

## ВВЕДЕНИЕ

Изучение дисциплин «Проектирование речных гидротехнических сооружений» и «Речные гидротехнические сооружения» в рамках специализации «Строительство гидротехнических сооружений повышенной ответственности» — важная часть подготовки специалиста-гидротехника, которому в практической деятельности при проектировании и строительстве, а также при эксплуатации гидроузлов различного назначения (гидроэлектростанций (ГЭС), гидроаккумулирующих электростанций (ГАЭС) и других гидротехнических и гидроэнергетических объектов) необходимо решать вопросы, связанные с созданием водосбросных сооружений, которые в обязательном порядке входят в состав таких комплексов.

В первом разделе учебно-методического пособия даются описание основных типов и конструкций различных водосбросных систем, предназначенных для сопряжения бьефов гидроузлов, в том числе высоконапорных; оценка преимуществ и недостатков этих систем применительно к различным условиям эксплуатации; приводятся сведения о способах и устройствах гасителей кинетической энергии сбрасываемого потока; уделяется особое внимание гидродинамическим и кавитационным силовым воздействиям со стороны высокоскоростного потока на строительные конструкции. При проектировании водосбросов приведенная информация очень полезна для обучающегося, поскольку данные о динамических и кавитационных воздействиях плохо поддаются расчетным методам, а получаются, как правило, опытным путем.

Основное внимание уделяется работе так называемых вихревых водосбросов, т.е. водосбросов, использующих закрученные потоки. В связи с чем второй и третий разделы посвящены таким системам, в которых применяются либо монозакрученный поток, либо два взаимодействующих потока, противоположно закрученных и расположенных соосно. Отмечается широкий диапазон работы вихревых систем по напорам и расходам. Показано широкое разнообразие вихревых водосбросов по конструктивным схемам. Водосбросы, как и гидроузлы в целом, индивидуальны. Состав сооружений и компоновочные решения гидроузлов чрезвычайно разнообразны: нет ни одного гидротехнического комплекса, конструкция и условия работы которого были бы похожи на другой гидроузел, что связано с различными природными условиями возведения гидротехнических объектов. Широкий спектр факторов, который следует учитывать, значительно усложняет процесс проектирования таких объектов. Их параметры, компоновка, типы сооружений и оборудования теснейшим образом связаны с топографическими, геологическими, гидрологическими и другими условиями местности и климатом.

В третьей главе приводится пример гидравлического расчета контрвихревого гасителя кинетической энергии сбрасываемого потока. Расчет на основании исходных данных о напоре и расходе позволяет определить основные геометрические параметры проточной части, что дает возможность использовать такой водосброс применительно к условиям технического задания по курсовому проектированию. Далее помещены данные о гидродинамических воздействиях на строительные элементы, являющиеся границами течения. В последнем разделе содержатся рекомендации в отношении кавитационной опасности.

В учебно-методическом пособии содержится большое количество чертежей и схем, наиболее важные количественные данные, а также числовой пример, позволяющий обучающемуся лучше воспринимать материал.

Данное учебно-методическое пособие может быть использовано также магистрами и аспирантами, занимающимися вопросами гидротехнического строительства.

# 1. ВОДОСБРОСНЫЕ СООРУЖЕНИЯ В СОСТАВЕ ГИДРОТЕХНИЧЕСКИХ УЗЛОВ

## 1.1. Типы водосбросных сооружений

Конструкция и компоновочные решения водосбросных сооружений в составе гидроузлов весьма разнообразны и зависят от пропускаемого расхода, перепада уровней верхнего и нижнего бьефов гидроузла, его назначения и типа основных сооружений. В большой степени конструкция водосброса обусловлена геологическими характеристиками пород, в которых или через которые прокладывается сооружение, топографическими условиями створа строительства и требованиями к режимам сопряжения высокоскоростного потока с нижним бьефом [1].

Водосбросы могут различаться по признакам:

- гидравлическим — безнапорные (наличие свободной поверхности течения воды в проточной части) и напорные;
- конструктивным — открытые или закрытые (т.е. замкнутого поперечного сечения); к последним можно отнести трубчатые, туннельные, шахтные и др.);
- компоновочным — плотинные (водосброс устроен в теле плотины) и береговые (водосброс устроен вне тела плотины и расположен в массиве грунта левого или правого примыкания к створу основных сооружений гидроузла).

Примеры плотинных водосбросов показаны на рис. 1.1, на котором изображены бетонные гравитационные плотины (рис. 1.1, *а, б*) и бетонная арочная (рис. 1.1, *в*). На рис. 1.1, *а* приведен пример комбинированного двухъярусного водосброса. Так поступают в ряде случаев при строительстве гидроузла, когда возникает необходимость пустить сооружение в работу на пониженных напорах с плотиной, еще не достроенной до проектных отметок. При этом сооружают временный глубинный водосброс, который сопрягается с водобойным колодцем. Этот водосброс уже будет напорным и закрытым до его сопряжения с водобойным колодцем. Далее при достройке плотины сооружают постоянный безнапорный открытый водосброс на отметке нормального подпорного уровня (НПУ) [2].

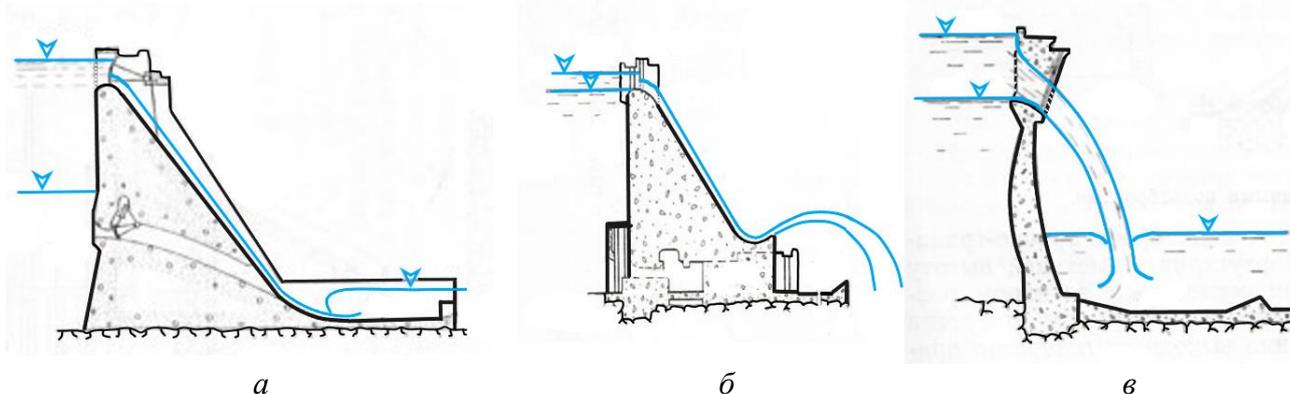


Рис. 1.1. Водосбросные сооружения в составе бетонных плотин:

- а* — открытый безнапорный плотинный эксплуатационный водосброс в составе бетонной гравитационной плотины с гасителем энергии в виде водобойного колодца;
- б* — открытый безнапорный плотинный водосброс в составе бетонной гравитационной плотины с гашением энергии в виде отброса струи;
- в* — открытый безнапорный плотинный водосброс в составе арочной бетонной плотины с гашением энергии в виде свободно падающей струи

Трасса береговых водосбросов не совмещается с плотиной, а проходит в массивах береговых устоев. Наиболее распространенный тип берегового водосброса — быстроток, который является открытым, безнапорным водосбросным сооружением. Диапазон по пропуску расхода таких сооружений очень широк: от нескольких десятков кубических метров в секунду до нескольких тысяч. В основном применение быстротоков наблюдается в составе гидроузлов с грунтовыми плотинами. На рис. 1.2 показан пример конструкции такого быстротока. Иногда быстротоки в своей низовой части оборудуются многоступенчатым перепадом.

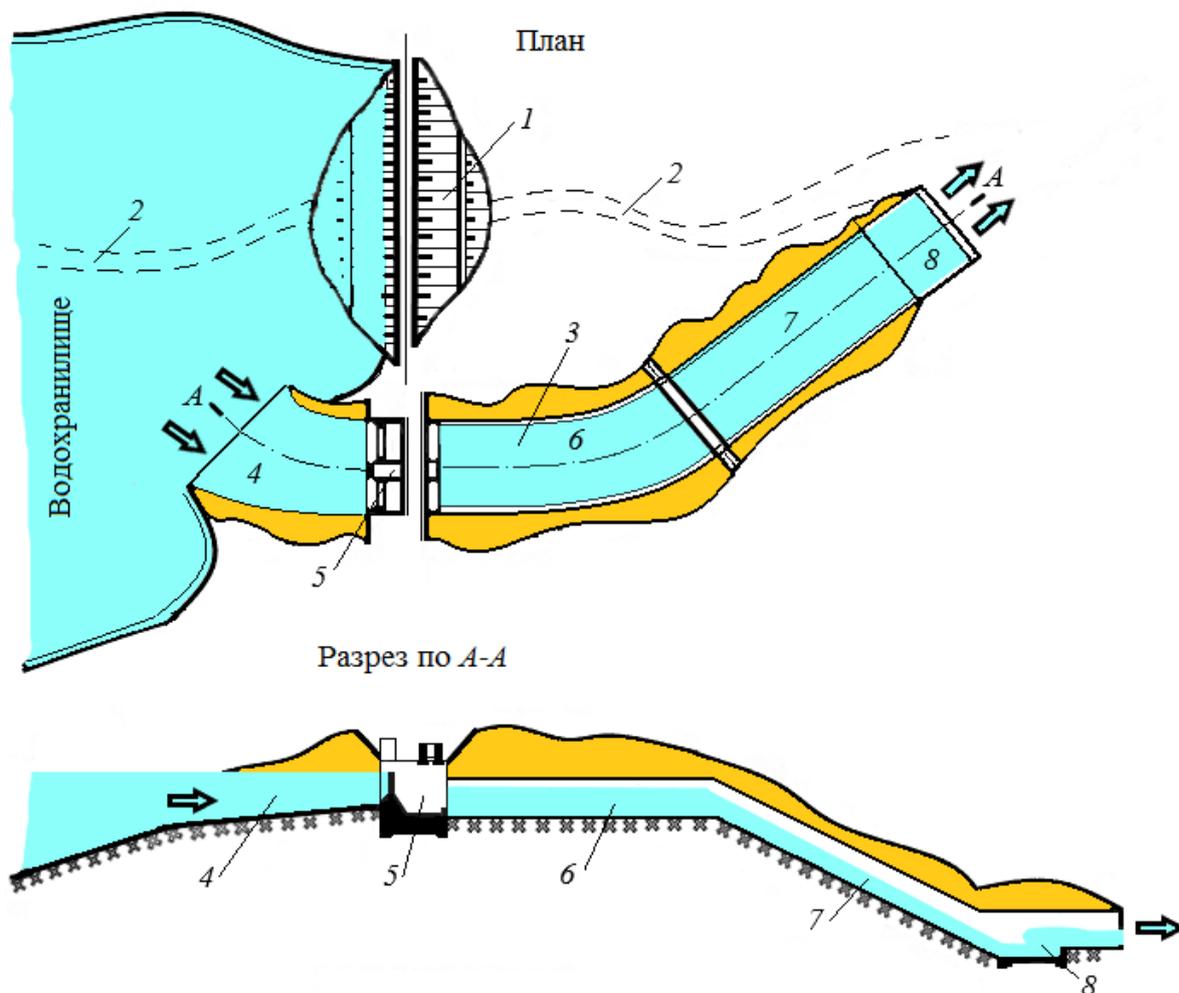


Рис. 1.2. Правобережный быстроток в составе гидроузла с грунтовой плотиной и сопряжением с нижним бьефом в виде водобойного колодца, выполняющего роль гасителя:  
 1 — грунтовая плотина; 2 — река; 3 — трасса быстротока; 4 — водоприемная часть;  
 5 — затворная группа; 6 — горизонтальная часть; 7 — быстроточная часть; 8 — водобойный колодец

Шахтные водосбросы нашли широкое применение в практике гидротехнического строительства (рис. 1.3). Они весьма разнообразны в конструктивном и компоновочном отношении. На рис. 1.3, а приведены типичная схема планового расположения шахтного водосброса с горизонтальным отводящим туннелем, который может быть выполнен по напорной или безнапорной гидравлическим схемам, на рис. 1.3, б — одна из возможных схем головной части шахтного водосброса с кольцевой симметричной воронкой. На рис. 1.4 показаны два шахтных водосброса автоматического действия в работе гидроузла Тери в Индии и хорошо видна форма воронки, образованная сливающейся водой, на заднем плане — воронка второго шахтного водосброса. Гребень водослива находится на отметке НПУ без бычков с регулирующими затворами, как на рис. 1.3, б.

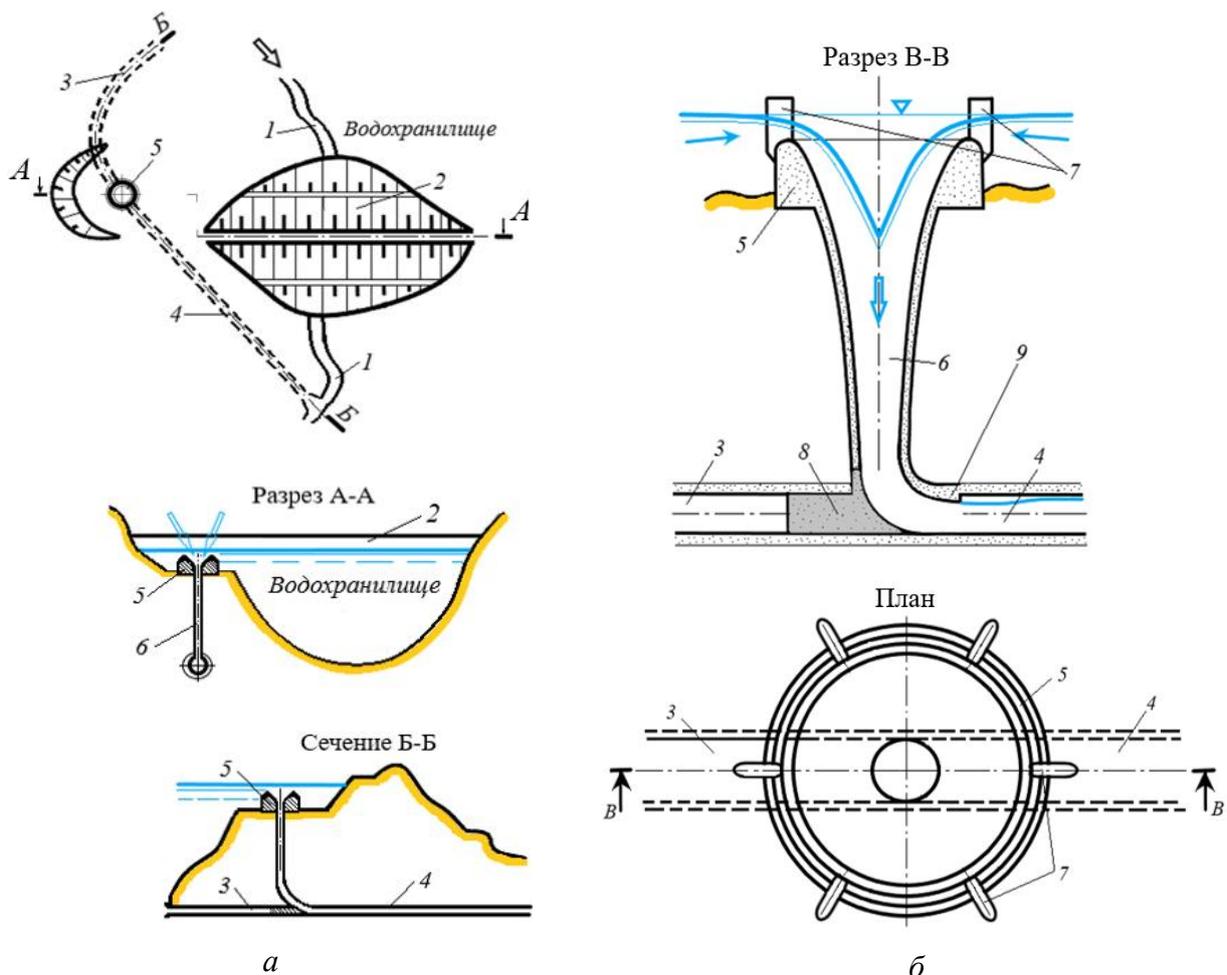


Рис. 1.3. Шахтный водосбор с водоприемной частью в виде воронки:

*а* — плановое расположение; *б* — конструкция водоприемного узла: 1 — русло реки; 2 — грунтовая плотина; 3 — туннель строительного периода; 4 — трасса эксплуатационного туннельного водосбора; 5 — кольцевая воронка; 6 — шахта водосбора; 7 — опорные бычки для установки регулирующих затворов; 8 — «пробка»; 9 — дефлектор для создания напорного режима течения воды в шахте и безнапорного режима в горизонтальном отводящем туннеле



Рис. 1.4. Водослив автоматического действия шахтного водосбора действующего гидроузла Тери (Индия)

(Электронный ресурс [https://www.google.com/search?sca\\_esv=25d4fcab23a30d49&sxsrf=ACQVn0\\_EZteyfnfYXkNAKyfkCKlcVhhTbg:1710002491182&q=%D0%93%D0%B8%D0%B4%D1%80%D0%BE%D1%83%D0%B7%D0%B5%D0%BB+%D0%A2%D0%B5%D1%80%D0%B8+%D0%B2+%D0%98%D0%BD%D0%B4%D0%B8%D0%B8&tbm=isch&source=lnms&sa=X&ved=2ahUKEwi95bTYz-eEAxXODRAIHUiCB\\_kQ0pQJegQIDBAB&biw=1536&bih=762&dpr=1.25#imgrc=HiItcP6z54crZM](https://www.google.com/search?sca_esv=25d4fcab23a30d49&sxsrf=ACQVn0_EZteyfnfYXkNAKyfkCKlcVhhTbg:1710002491182&q=%D0%93%D0%B8%D0%B4%D1%80%D0%BE%D1%83%D0%B7%D0%B5%D0%BB+%D0%A2%D0%B5%D1%80%D0%B8+%D0%B2+%D0%98%D0%BD%D0%B4%D0%B8%D0%B8&tbm=isch&source=lnms&sa=X&ved=2ahUKEwi95bTYz-eEAxXODRAIHUiCB_kQ0pQJegQIDBAB&biw=1536&bih=762&dpr=1.25#imgrc=HiItcP6z54crZM))

Разновидностью шахтных водосбросов являются шахтные водосбросы с закруткой потока. Такие водосбросы в некоторых литературных источниках называют вихревыми шахтными водосбросами [3; 4]. Вихревое движение в широком смысле подразумевает течение с закруткой, поэтому эти названия близки по смыслу. Конструкции отличаются от традиционных схем тем, что используют поток воды не поступательный вдоль оси трубы (продольный), а закрученный. Для этого входная воронка выполнена в виде спиральной камеры, которая закручивает поток на входе в шахту, и уже далее в шахте формируется продольно-циркуляционное течение (закрученный поток). На рис. 1.5 показан такой водосброс.

Шахтные водосбросы указанных двух типов относятся к береговым сооружениям. Режим движения воды в них напорный, сам водосброс туннельного типа, т.е. с закрытой проточной частью.

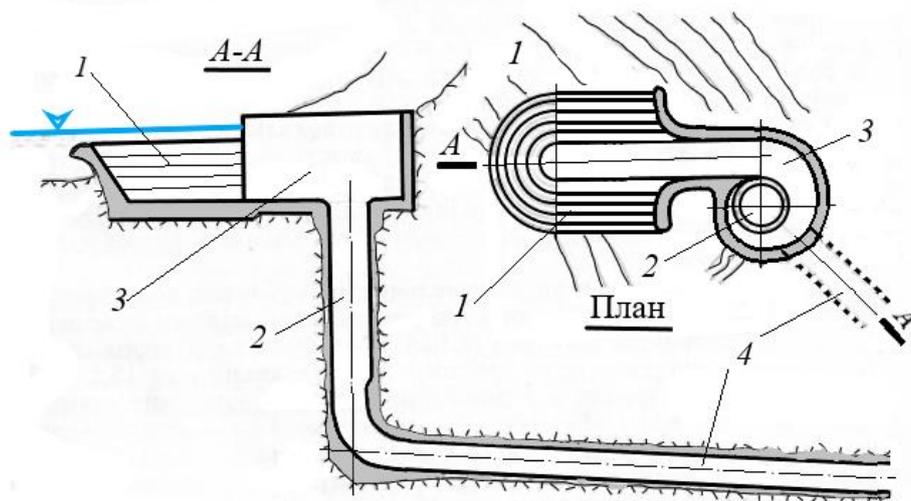


Рис. 1.5. Шахтный водосброс с закруткой потока (вихревой):

1 — подводящий канал; 2 — шахта; 3 — завихритель в виде спиральной камеры; 4 — отводящий туннель

К водосбросам с закруткой потока, кроме упомянутого вихревого шахтного водосброса, относится целый класс конструкций, состоящих из водоприемника, соединенного с подводящим водоводом, закручивающего устройства (завихрителя), камеры гашения (для контрвихревого водосброса) и отводящего канала. Режим течения воды в подводящем водоводе продольно-осевой, а в отводящем канале может быть как продольно-осевой, так и продольно-циркуляционный.

В качестве закручивающего устройства могут применяться любые типы завихрителей. Для гидротехнических задач наиболее подходят локальные завихрители с тангенциальным или спиральным подводом. Также могут применяться регулируемые или нерегулируемые лопаточные завихрители.

В качестве отводящего водовода целесообразно использовать туннель строительного водосброса.

Водосбросы с закруткой потока при наличии длинного горизонтального участка туннеля могут иметь головную, промежуточную и концевую схемы расположения закручивающего устройства. Головная схема в ряде случаев может являться наиболее предпочтительной по компоновочным условиям.

Вихревые водовыпуски, имеющие короткий горизонтальный участок водовода, устраиваются по концевой схеме.

По способу гашения энергии водосбросы с закруткой потока подразделяются на:

– вихревые. В этих конструкциях закрученный поток формируется в отводящем канале.

При длинном отводящем канале закрученный поток за счет сил трения гасит свою энергию к концу канала, а при коротком отводящем канале гашение энергии происходит за счет выпуска в атмосферу или в виде затопленной струи;

– контрвихревые. В таких конструкциях в подводящем и отводящем водоводах течение обычное, продольно-осевое. Гашение энергии происходит на очень коротком участке проточной части (на длине порядка 6–8 диаметров). Гаситель может располагаться в любом месте трассы водосброса, что является несомненным преимуществом перед остальными схемами. Организация контрвихревого течения может осуществляться в виде соосных, противоположно вращающихся слоев воды или за счет взаимодействия закрученных потоков, имеющих разные оси вращения.

В закрученном потоке возникают центробежные силы, формирующие особое распределение давления в потоке. Оно заключается в том, что увеличение давления направлено в сторону стенок водовода. Такое распределение давления препятствует развитию кавитации на твердых границах течения и в то же время формирует приосевую полость с пониженным давлением. В зависимости от режима течения эта полость может быть заполнена парами воды, если полость замкнута, или воздухом, если полость имеет выход в атмосферу.

Контрвихревые водосбросы с соединением соосных противоположно вращающихся потоков могут быть устроены по напорной (рис. 1.6, а) или безнапорной (рис. 1.6, б) схемам.

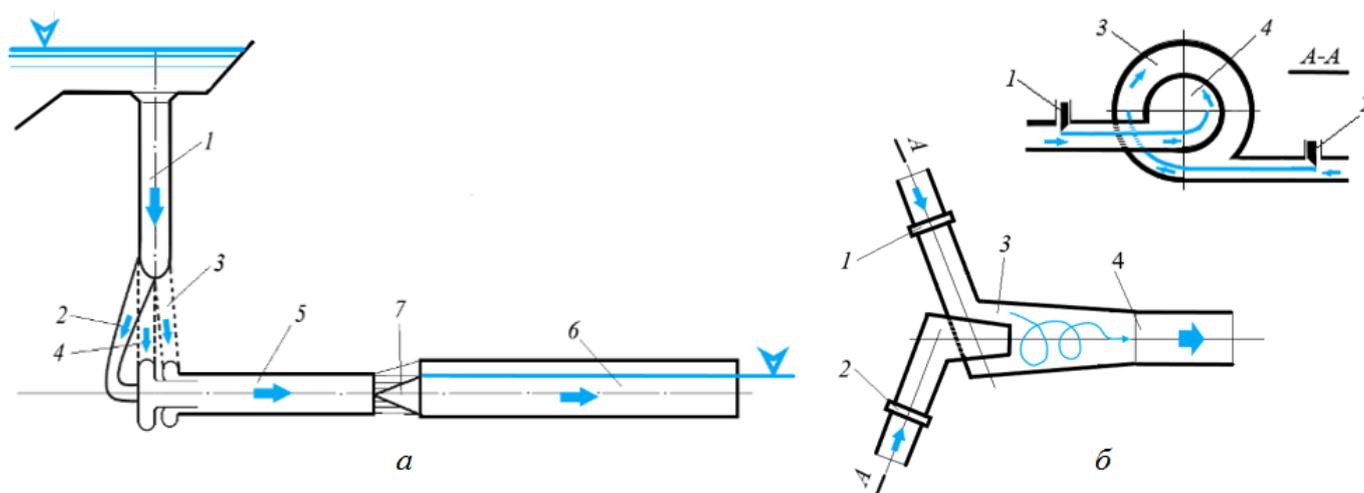


Рис. 1.6. Контрвихревой водосброс с соосным вращением потоков:

- а* — напорная схема: 1 — вертикальная напорная подводящая шахта; 2 — водовод для центральной струи; 3 — водовод для завихрителя внешнего закрученного потока; 4 — водовод для завихрителя внутреннего закрученного потока; 5 — камера гашения; 6 — безнапорный отводящий водовод; 7 — переходной участок;
- б* — безнапорная схема: 1, 2 — затворные камеры с плоскими затворами; 3 — камера гашения; 4 — отводящий водовод

## 1.2. Способы и устройства для гашения кинетической энергии потоков

Гидравлические условия сопряжения важны при проектировании гидроузлов. Эти условия связаны с выбором типа водосброса, его конструкции и компоновочными решениями в составе всего строительного комплекса. После возведения гидроузла естественные условия протекания речного потока в области гидроузла изменяются. Речная вода пропускается через водопроводящие сооружения, размеры и формы которых резко отличаются от естественных. Как правило, увеличиваются скорости течения, что негативно сказывается на состоянии нижнего бьефа. Особенно остро это проявляется во время прохождения паводков.

Расходы сбрасываемых потоков воды и их мощность могут быть весьма значительными, например Жигулевская ГЭС на р. Волга мощностью около 2500 МВт. При пропуске в паводок через водосбросные сооружения этого гидроузла  $62\,000\text{ м}^3/\text{с}$  в нижнем бьефе гасится примерно 7000 МВт кинетической энергии воды, что примерно в 3 раза превышает мощность потока, используемого гидротурбинами станции [5].

Гашение кинетической энергии происходит в результате нескольких факторов. Прежде всего за счет формирования в потоке гидравлического прыжка, водоворотных и вихревых зон, турбулизации потока, которые являются чрезвычайно мощным и эффективным средством гашения энергии. Следующие по значимости факторы — процессы соударения струй, которые образуются в результате взаимодействия потока с препятствиями, установленными на его пути. Определенную долю в баланс гашения кинетической энергии сбрасываемого потока вносят и процессы деформации части русла реки в нижнем бьефе за счет взаимодействия потока с донными отложениями при их перемещении в результате размывов. Последнее обстоятельство относится к слабым, эрозионным грунтам.

Конструкция крепления зоны нижнего бьефа, в границах которого происходит гашение кинетической энергии потока, исходящего из водопропускных сооружений гидроузла, зависит прежде всего от режима течения в этой зоне, скорости потока и пропускаемого расхода. Гидравлические режимы течения потока в зоне его гашения называются условиями сопряжения бьефов. На этом участке происходит резкое уменьшение скоростей течения до значения бытовых, т.е. скоростей в естественном русле. Уменьшение скоростей течения связано с потерей энергии потоком. В гидравлике известны различные режимы течения воды в нижнем бьефе. Основные из них донные, поверхностные и режим отброшенной струи. На практике встречаются также комбинированные или смешанные режимы течения. Схемы, иллюстрирующие такие гидравлические режимы, приведены на рис. 1.7.

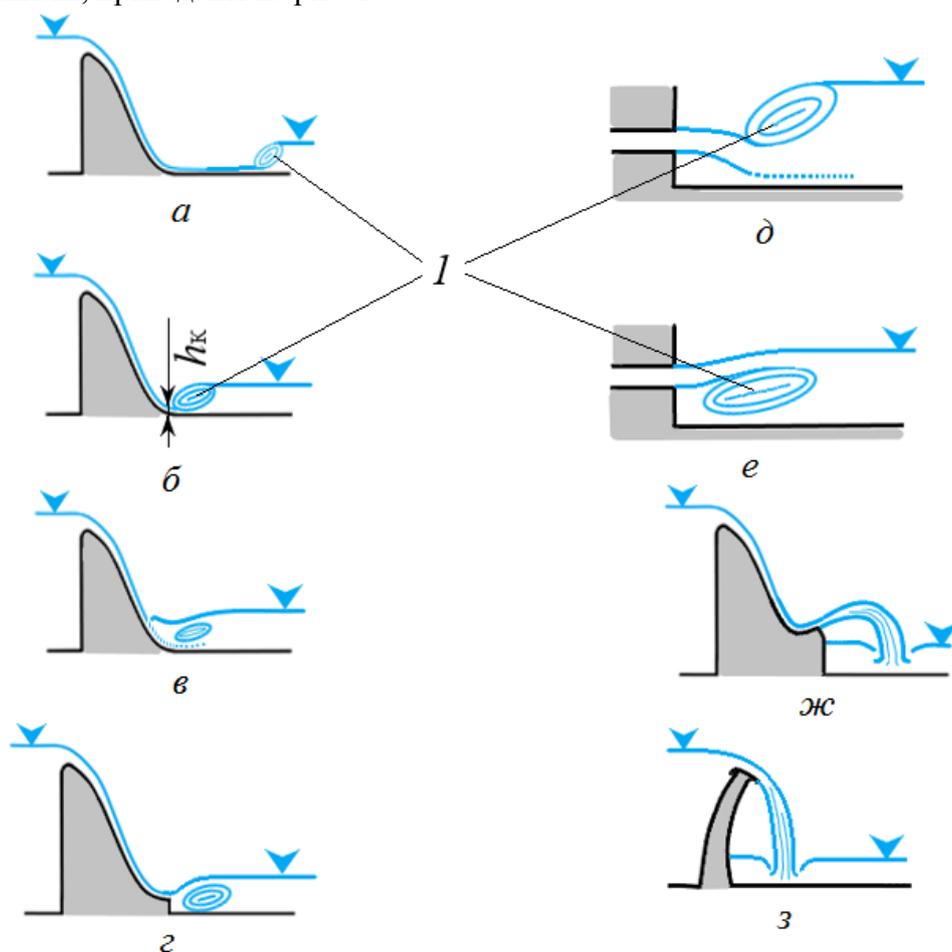


Рис. 1.7. Гидравлические режимы течения воды в нижнем бьефе за водосбросными сооружениями: гидравлический прыжок поверхностного водосброса соответственно: *a* — отогнанный; *б* — в критическом состоянии; *в* — донный (затопленный); *г* — поверхностный; гидравлический прыжок донного водосброса соответственно: *д* — донный; *е* — поверхностный; *ж* — сопряжение бьефов с помощью отброса струи от носка-трамплина; *з* — сопряжение бьефов посредством свободной струи; *1* — валец

Каждый из указанных режимов имеет свои достоинства и недостатки. При донном режиме обеспечивается максимальное гашение кинетической энергии и формируются мощные вихревые (водоворотные) области, которые образуют поверхностный валец над транзитным донным течением с повышенной турбулентностью. Вихревая область в виде верхнего вальца  $I$  показана на рис. 1.7, *а, б, д*.

При поверхностном режиме течения картина обратная (см. рис. 1.7, *в, з, е*). Водоворотная зона (придонный валец) образуется у дна, а транзитный поток с большими скоростями проходит сверху водного массива в нижнем бьефе. Чисто поверхностный режим течения устанавливается довольно редко, поскольку уровень воды при паводке быстро изменяется, переводя течение в режим с подтоплением струй. Кроме того, поверхностный поток при таком режиме слабо управляется, что является существенным недостатком. При поверхностном режиме пропуск плавающих тел не вызывает затруднений, что важно при эксплуатации сооружения с большим количеством плавающего мусора в водохранилище. Степень гашения энергии поверхностного режима существенно уступает донному режиму.

Комбинированный, или смешанный, режим может возникать при изменении скоростей сбрасываемого потока и отметок воды в нижнем бьефе (ее глубины). Изменение режимов течения связано с наступлением критических режимов, разграничивающих донный и поверхностный прыжки.

В случаях высоких бетонных плотин на скальном основании предусматривают высокий носок-трамплин (иногда говорят уступ-трамплин). При таком уступе струя, сходящая с носка, отбрасывается достаточно далеко от подошвы плотины (см. рис. 1.7, *ж*). При строительстве арочных плотин иногда применяют водосброс в виде свободно падающей струи (см. рис. 1.7, *з*). В месте падения струи на дно нижнего бьефа образуется воронка размыва. При правильно запроектированной плотине воронка размыва должна располагаться на таком расстоянии от грани плотины, при котором опасность подмыва последней исключается. Такой режим сопряжения с нижним бьефом распространен в практике гидротехнического строительства. Этот способ достаточно прост в конструктивном исполнении и устойчив в работе, обладает высокой степенью гашения кинетической энергии потока. К недостаткам следует отнести образование при работе водосброса большого облака водяной пыли. Это облако окутывает большую часть сооружений со стороны нижнего бьефа, вызывая коррозию стальных конструкций. Особую опасность это явление вызывает при отрицательных температурах воздуха (в зимний период), при которых происходит сильное обледенение конструкций сооружения.

На рис. 1.8 показана схема течения в режиме затопленного (донного) прыжка, обладающем максимальной гасящей способностью.

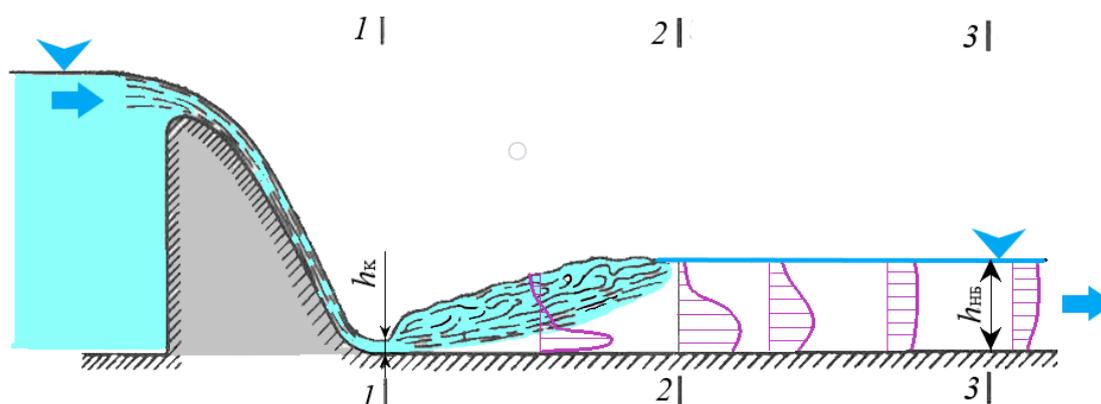


Рис. 1.8. Распределение скоростей в поперечном сечении при донном гидравлическом прыжке

При переходе потока в сжатое сечение 1-1 за плотиной происходит перераспределение энергии из потенциальной в кинетическую. В сечении 1-1 поток обладает максимальной скоростью течения и минимальной, критической глубиной в сжатом сечении  $h_k$ . В гидравлическом прыжке при переходе от сечения 1-1 к сечению 2-2 наблюдается увеличение глубины потока, как видно из рис. 1.8. Здесь распределение скоростей имеет знакопеременный вид. В сечении 2-2 формируется глубина воды в нижнем бьефе  $h_{н.б.}$ . Таким образом, в области между этими двумя сечениями уменьшается скорость потока (уменьшается кинетическая энергия) и возрастает потенциальная энергия, поскольку глубина воды увеличилась. Такой гидравлический режим приводит к снижению скорости течения до значения бытовой скорости, т.е. скорости в естественных (речных) условиях, что и требуется для нормальной работы нижнего бьефа. К сечению 3-3 поток полностью успокаивается и приобретает распределение скоростей в поперечном сечении, как показано на рис. 1.8. Участок течения между сечениями 1-1 и 3-3 сопровождается повышенной турбулентностью и сильными пульсациями скорости и давления на основании канала, вызывая диссипацию энергии.

Изучение условий гашения энергии потока в нижнем бьефе гидроузла показывает, что в большинстве случаев эти условия получаются тяжелыми как по причине малых глубин воды (бытовая глубина в нижнем бьефе меньше второй сопряженной глубины гидравлического прыжка), так и вследствие возникновения интенсивных сбойных течений. В таких случаях за гладким водобоем даже большой протяженности при размываемых грунтах могут возникнуть глубокие разрушительные деформации русла, подмывы креплений и, как следствие, их разрушения.

Для предотвращения этих негативных явлений, а также сокращения длины и мощности крепления нижнего бьефа применяют гасители избыточной энергии водосбросного потока. Простейшие, но очень эффективные гасители: водобойные колодцы (см. рис. 1.1, а), водобойные стенки и их комбинации. Более сложны такие гасители, как пирсы и шашки различной формы и комбинаций. Применяются и другие гасители [4]. На рис. 1.9 приведены некоторые из перечисленных выше гасителей.

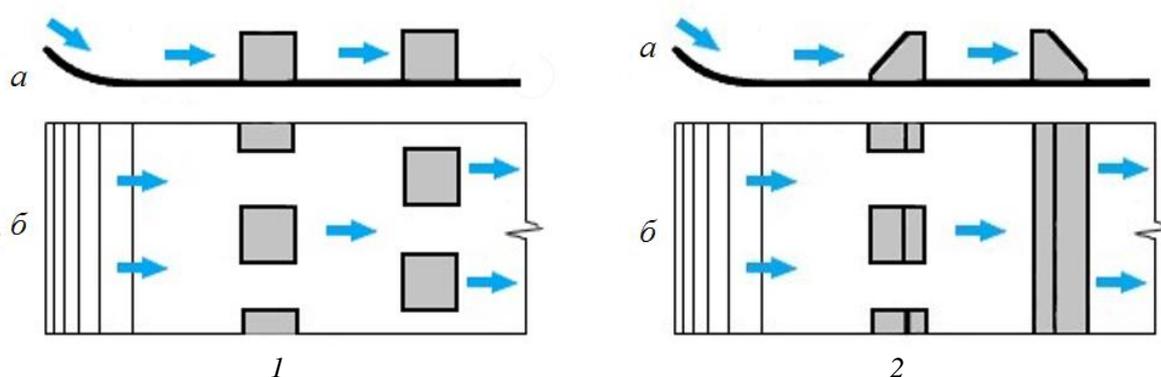


Рис. 1.9. Типы гасителей кинетической энергии потока:

1 — кубические гасители (шашки), расположенные в шахматном порядке;

а — продольный разрез; б — план, фрагмент;

2 — гаситель А.С. Образовского, сочетание разрезных трапециевидальных гасителей и водобойной стенки;

а — продольный разрез; б — план, фрагмент

Конец ознакомительного фрагмента.

Приобрести книгу можно

в интернет-магазине

«Электронный универс»

[e-Univers.ru](http://e-Univers.ru)