

## Гидравлика и инженерная гидрология

УДК 502/504:627.83

**В. А. ВОЛОСУХИН, Е. Н. БЕЛОКОНЕВ**

Федеральное государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Новочеркасская государственная мелиоративная академия», Новочеркасск

### **ПОВЫШЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ РАБОТЫ ВОДОСБОРНЫХ СООРУЖЕНИЙ ВОДОХРАНИЛИЩНЫХ ГИДРОУЗЛОВ**

*На основании анализа современного состояния проектирования водопропускных, включая водосбросные, сооружений гидроузлов, а также опыта экспериментальных научных исследований дана характеристика водосбросов Ставропольского края и Башкирии. Описаны конструктивные решения элементов водосбросов и особенности их гидравлических расчетов. Разработаны рекомендации по повышению гидравлической безопасности открытых береговых паводковых водосбросов-быстроходов.*

*Водосбросные сооружения, водохранилищные гидроузлы, надежность работы, гидравлические расчеты, гидравлическая безопасность, водосбросы-быстроходы, проектирование водопропускных сооружений гидроузлов.*

*On the basis of the analysis of the present state of projecting waterway structures of hydrological units including water discharge outlets as well as the experience of experimental scientific researches. There is given a characteristics of water discharge facilities of the Stavropol Territory and Bashkiriya, the concept of their hydraulic safety is mentioned. There are described structural solutions of elements of water discharge facilities and peculiarities of their hydraulic estimations. Recommendations on hydraulic safety improvement are given for open bank flood waste way chutes.*

*Water discharge facilities, water reservoir hydraulic units, reliability of operation, hydraulic estimations, hydraulic safety, waste way chutes, projecting of waterway structures of hydrological units.*

При рассмотрении вопросов обеспечения гидравлической безопасности гидротехнических сооружений, находящихся в эксплуатации Ташлинского водосброса, Невинномысского гидроузла, проектируемого водосбросных

дополнительного паводкового водосброса Усть-Джегубинского гидроузла на реке Кубань в Ставропольском крае, приняты во внимание результаты натурных обследований и научных гидравлических исследований [1–3]. Используются материалы научных гидравлических исследований на стадии ТЭО паводкового берегового водосбора Юмагузинского гидроузла на реке Белая в Республике Башкортостан [4]. Приводимые сведения базируются также на теоретических и экспериментальных лабораторных исследованиях этих сооружений, выполненных в ОАО «Севкавгипроводхоз» (город Пятигорск) и в гидротехнической лаборатории Новочеркасской государственной мелиоративной академии (НГМА).

В процессе исследований проведен анализ современного состояния проектирования, строительства и эксплуатации береговых открытых водосбросов-быстротоков.

Известно, что на работу быстротока существенное влияние оказывают геодезический перепад, протяженность лотка (водоската) и очертание его продольного профиля.

В условиях обитания человека в техносфере для обеспечения нормальных условий жизнедеятельности важно знать, какой уровень опасности составляет тот или иной техногенный компонент. При решении водохозяйственных задач исходят из бассейнового принципа управления количественными и качественными показателями водных ресурсов, которые формируются на водосборной территории данного бассейна. Регулируют и перераспределяют поверхностный сток путем строительства водохранилищных гидроузлов, являющихся техногенными источниками опасности в рамках бассейновой геосистемы [5]. Обеспечение необходимого уровня безопасности в зоне деятельности водоподпорного гидротехнического сооружения (ВГТС) — актуальная проблема в научном и практическом плане.

Безопасность водоподпорного гидротехнического сооружения в целом

складывается из безопасности гидрологической, гидравлической, конструктивной, фильтрационной и руслоформирующей. Анализ отечественного и зарубежного опыта эксплуатации таких сооружений показывает, что более 30 % аварийных ситуаций с последующим разрушением напорного фронта гидроузлов обусловлено низким уровнем гидравлической безопасности водосбросных сооружений [6]. Гидравлическая безопасность характеризуется способностью водосбросного сооружения обеспечивать пропуск расчетных расходов воды из верхнего бьефа в нижний без возникновения опасных явлений в зоне действия водоподпорного гидротехнического сооружения и на самом сооружении.

В практике гидротехнического строительства на гидроузлах с грунтовыми (земляными) плотинами с учетом топографических и геологических условий, а также условий компоновки сооружений часто проектируют береговые открытые водосбросы для пропуска паводковых расходов от 500 до 12 000 м<sup>3</sup>/с через одно сооружение [7]. Эти водосбросы состоят из подводящего канала, предназначенного для плавного подвода воды к входному оголовку, водослива фронтального типа (входного оголовка), регулирующего сбрасываемый расход, водоската (быстротока), реже — в виде многоступенчатого перепада, водобоя с гасительными устройствами, рисбермы, отводящего русла.

Конструктивное решение входного оголовка должно способствовать обеспечению необходимой пропускной способности сооружения при безопасных условиях эксплуатации (недопущения повышения уровня воды в водохранилище выше форсированного подпертого уровня и тем более перелива через гребень грунтовой плотины). Перелив воды через гребень такой плотины может спровоцировать размыв плотины, образование прорана, волну прорыва, затопление огромной территории в нижнем бьефе, значительные человеческие жертвы, привести к огромному материальному ущербу.

Анализ аварий гидроузлов в нашей стране и за рубежом показал, что одной из причин катастроф является отказ механического оборудования (заклинивание затворов, обморожение их пазов при плоских затворах, прекращение подачи электроэнергии и др.) [6].

В мировой практике с целью повышения гидравлической безопасности береговых открытых паводковых водосбросов наряду с управляемыми пролетами (с затворами) предусматривают пролеты входного оголовка (один, реже два), работающие в автоматическом режиме (затворы отсутствуют) [8]. Отметка порога и размеры пролетов автоматического действия определяются гидравлическими расчетами и обязательно уточняются в результате лабораторных исследований на экспериментальной установке (для сооружений класса I).

Несмотря на известные в технической литературе сведения по проектированию, строительству и эксплуатации, некоторые вопросы гидравлического расчета, принятие того или иного конструктивного решения водосбросов разработаны еще недостаточно. Взаимодействие обладающих значительной кинетической энергией бурных потоков с дном и стенками (разделительными и боковыми) водоската (лотка быстротока) может приводить к различного рода волнообразованиям, сбойным явлениям. При этом существенным образом возрастают динамические нагрузки на дно. Могут отмечаться выплески воды через бортовые стенки, особенно в месте сопряжения лотка с водобойным колодцем или другими гасителями энергии, аэрация потока и кавитационные явления.

На основании анализа результатов научных гидравлических исследований водосбросных и водовыпускных гидротехнических сооружений гидроузлов были обобщены основные оценочные положения по обеспечению их гидравлической безопасности (рис. 1) [5]. В процессе лабораторных исследований пропускной способности входной части

(оголовка) необходимо тщательно проверять различные режимы работы с учетом бокового сжатия. Особое внимание при этом необходимо обращать на зону работы при напорах воды на водосливе, незначительно превышающих нижнюю обвязку затворов, т. е. на зону, в которой формула (1) при работе входной части как водослива с широким порогом

$$Q = m \sigma_{\text{сж}} b \sqrt{2g} H_0^{3/2} \quad (1)$$

или формула (2) при работе входной части по схеме «истечение из-под щита»

$$Q = \varphi \cdot \frac{b \varepsilon a_{\text{щ}}}{\sqrt{1 + \frac{\varepsilon a_{\text{щ}}}{H_0}}} \cdot \sqrt{2g} H_0, \quad (2)$$

где  $m$  — коэффициент расхода;  $\sigma_{\text{сж}}$  — коэффициент бокового сжатия;  $b$  — ширина всех отверстий водосборного сооружения;  $H_0$  — напор воды на водосливе с учетом скорости подхода;  $g$  — ускорение свободного падения;  $\varphi$  — поправочный коэффициент, учитывающий влияние потерь напора;  $a_{\text{щ}}$  — ширина открытого отверстия;  $\varepsilon$  — коэффициент вертикального сжатия потока;  $Q$  — расход воды ( $\text{м}^3/\text{с}$ ), пропускаемой через водосборное сооружение

не дают достаточно достоверных результатов [3, 4].

За входной частью располагается транзитная часть (водоскат). Чаще всего она представляет собой лоток прямоугольного поперечного сечения с одним или несколькими уклонами дна (прямыми, а иногда обратными) [4].

Одним из главных вопросов, которые приходится решать при расчете лотка в виде быстротока, является установление глубины воды за входной частью, т.е. в начале быстротока. В случае, когда входная часть быстротока проектируется такого же типа и размеров поперечного сечения, что и лоток водоската, то глубину в конце входной части можно принимать равной критической глубине. Если нормальная глубина на водоскате  $h_0 \leq 0,5h_{\text{кр}}$ , то, по данным В. А. Большакова, глубину воды в конце входной части допускается назначать  $(0,7 \dots 0,8)h_{\text{кр}}$ . В этом случае расстояние сечения с критической глубиной  $h_{\text{кр}}$  от входной части  $l_1$  можно определить по графику, приведенному в [9, рис. 13.9] при  $h = h_{\text{кр}}$ .

В случае отсутствия подтопления со стороны нижнего бьефа за исходную глубину воды в начале водоската

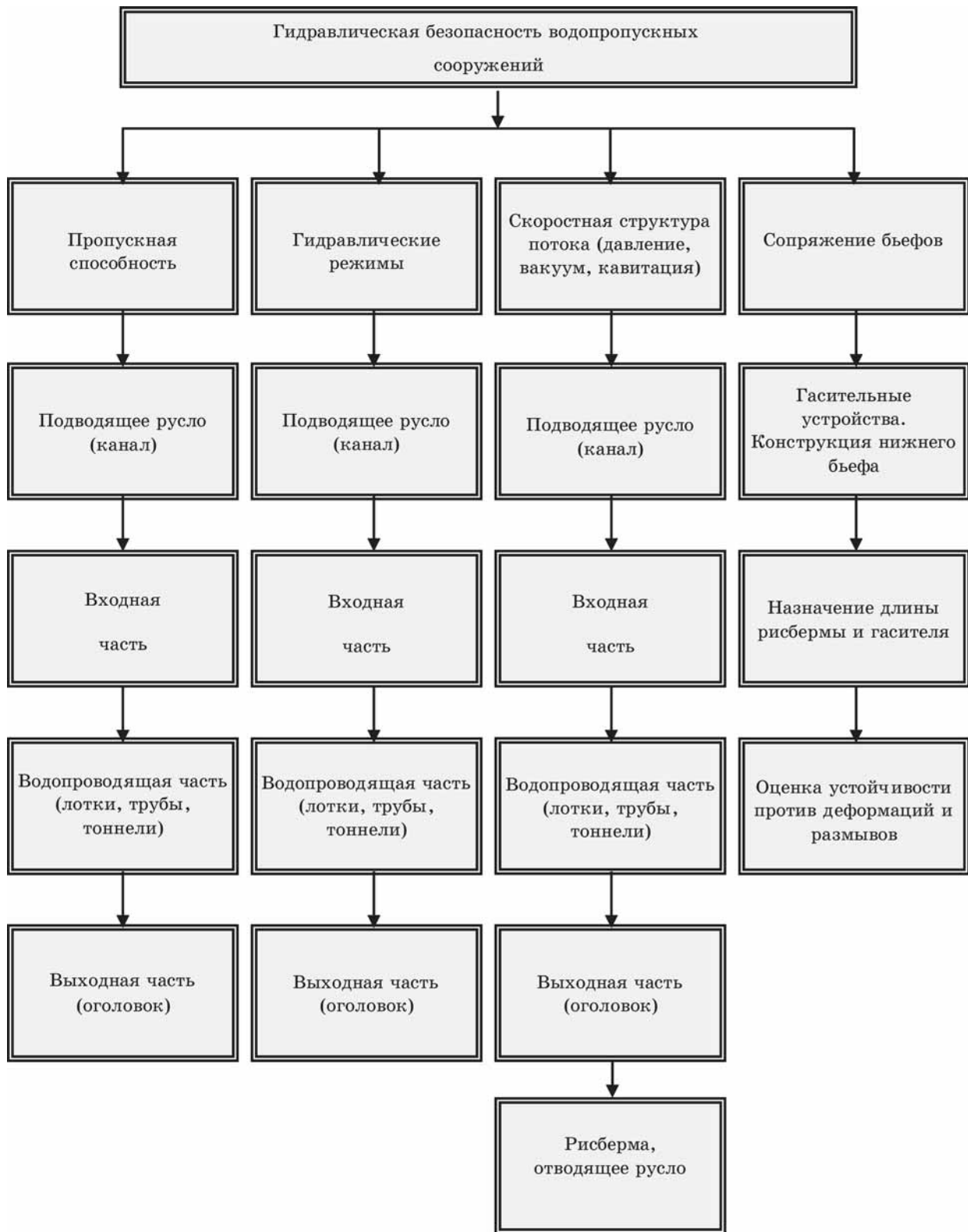


Рис. 1. Блок-схема изучения гидравлической безопасности водопропускных сооружений

(лотка быстроготока) можно принимать сжатую глубину  $h = h_i = \varepsilon a_{щ}$  (здесь  $\varepsilon$  — коэффициент вертикального сжатия при «истечении из-под щита», определяемый, по данным Н. Е. Жуковского, в зависимости от отношения  $a_{щ}/H_0$  по [9, с. 189]).

Водоскат (транзитная часть) предназначен для перевода потока с большими скоростями из верхнего бьефа в нижний. Гидравлический расчет водоската заключается в построении на нем кривой свободной поверхности, которая в любом створе позволяет по длине

определить глубину и скорость сбрасываемой воды.

В качестве исходных данных для расчета водоската применяют следующие параметры: длину, ширину, уклон, шероховатость, пропускаемый расход и глубину воды в начальном сечении (в конце входной части). Для расчета кривой свободной поверхности можно воспользоваться методом Чарномского и компьютерной программой.

Методика проведения исследований водоската заключается в изучении режимов: а) прохождения водного потока при широком диапазоне пропускаемых расходов (от  $Q_{\min}$  до  $Q_p$  и более); б) открытия водосбросных отверстий (поднятиях затворов)  $a_{\text{щ}}$  от минимального до полного. В процессе исследований измеряют уровни воды по длине водоската и среднестатистическую скорость в намечаемых характерных створах.

При проектировании транзитной части водосброса следует более осторожно подходить к варианту увеличения ширины лотка (водоската) на его конечном участке. Увеличение ширины лотка  $b$  в его конце (в форме раструба) имеет цель уменьшить удельные расходы по ширине лотка ( $q = Q/b \text{ м}^2/\text{с}$ ), соответственно глубину и скорость в его конце. По существующим рекомендациям угол отклонения вертикальных стенок от продольной оси должен быть не более  $12^\circ$ . Однако в реальных условиях может произойти отрыв потока от вертикальных стенок даже при угле их отклонения  $9^\circ$ , что подтверждается лабораторными исследованиями дополнительного водосброса Усть-Джегубинского гидроузла, когда предполагаемого растекания потока не отмечается [3]. Поток компактной струей устремляется в водобойный колодец. По мнению авторов, эффект возможен при проектировании расширяющегося водобойного колодца.

В процессе теоретических расчетов и лабораторных исследований следует изучить такие явления, как аэрация и волнообразование на водоскате.

Из практики проектирования и эксплуатации паводковых открытых водосборов-быстротоков установлено, что наличие повышенной шероховатости на дне водоската, особенно в концевой его части, способствует снижению скорости на нем, а следовательно, увеличению глубины и аэрации потока. Положительный эффект влияния искусственной шероховатости на скоростную структуру потока был установлен и при проведении лабораторных исследований берегового паводкового открытого водосброса Юмагузинского гидроузла на реке Белой (исследования Новочеркасской государственной мелиоративной академии) [4].

Устройство искусственной (усиленной) шероховатости в виде поперечных ребер с размерами, принятыми по данным исследований Ф. И. Пикалова и Е. А. Замарина, приводит к существенному снижению скоростей: с 27,7 до 19,24 м/с при высоте ребер  $C = a_n = 0,3 \text{ м}$ ; до 18,51 м/с (50 %) при  $C = a_n = 0,4 \text{ м}$ ; до 18,20 м/с (52 %) при  $C = a_n = 0,5 \text{ м}$  [4]. Используя результаты исследований скоростной структуры на водоскате, проектирование усиленной шероховатости с гидравлической и экономической точек зрения рекомендуется начинать с сечения по длине, в котором средняя скорость потока превышает 18...20 м/с.

В общем случае выбор конструкции выходной части зависит от назначения сооружения, инженерно-геологических данных русла, топографических и других условий. При проектировании выходной части паводковых водосбросов, основанием которых являются аллювиальные отложения значительной толщины, целесообразно отдать предпочтение водобойным колодцам (Невинномысский гидроузел, Краснодарское водохранилище, Усть-Джегубинский гидроузел на реке Кубань, Юмагузинский гидроузел на реке Белая в Башкортостане и др.). При наличии скальных оснований в конструкцию должны включаться гасители шашечного типа, пирсы, растекатели и др.

Из анализа опыта проектирования и эксплуатации водосбросных сооружений с водобойным колодцем следует, что сопряжение потока, поступающего с водоската (лотка) в водобойный колодец, будет эффективным, если дно водоската находится на уровне дна расширяющегося в плане водобойного колодца (при призматическом лотке водоската).

Размеры водобойного колодца устанавливаются гидравлическими расчетами из условия формирования совершенного гидравлического прыжка — наиболее эффективного гасителя избыточной кинетической энергии (рис. 2).

Установка по середине длины водобойного колодца сплошной водобойной стенки высотой почти равной

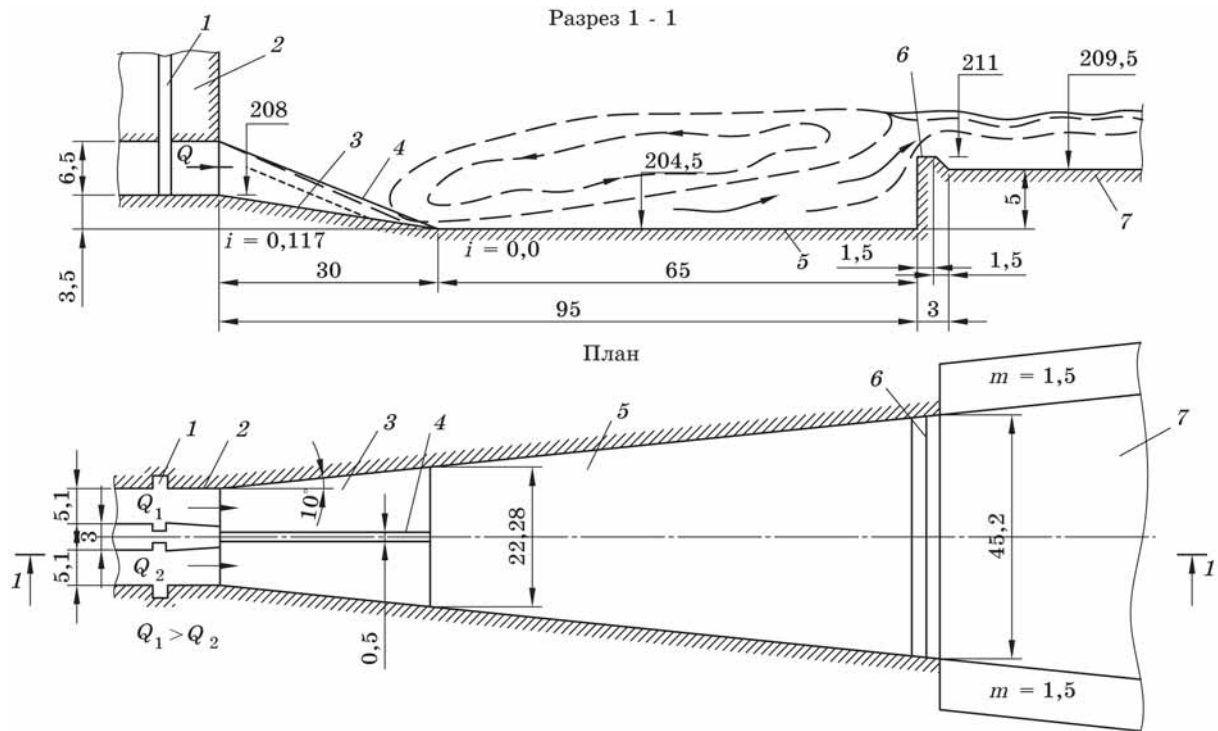


Рис. 2. Конструкция нижнего бьефа донного туннельного водовыпуска-водосброса с пандусом, разделительной и водобойной стенками, водобойным колодцем Юмагузинского гидроузла на стадии ТЭО: 1 — пазы; 2 — выходной оголовок; 3 — пандус; 4 — разделительная стенка; 5 — водобойный колодец; 6 — водобойная стенка; 7 — рисберма

глубине водобойного колодца не только не увеличивает гасительный эффект, но ухудшает процесс диссипации кинетической энергии: практически совершенный гидравлический прыжок отсутствует, за стенкой образуется застойная (буферная) зона, поток поверх водобойной стенки устремляется на рисберму со значительными скоростями и сбойными явлениями (рис. 3). Все это может привести к аварийной ситуации в нижнем бьефе гидроузла [4, 5].

Рисберма, расположенная непосредственно за водобоем (водобойным колодцем), предназначена: а) для гашения остаточной избыточной энергии

водного потока, б) для выравнивания эпюры удельных расходов и скоростей по ее ширине и длине, в) для вывода фильтрационных вод.

Длину рисбермы и крепления за ней следует устанавливать с учетом допустимых придонных среднестатистических и максимальных значений скорости однопроцентной обеспеченности, затухания интенсивности турбулентности, пульсационного давления. При этом целесообразно принимать в расчет опубликованные результаты исследований Д. И. Кумина, В. А. Базилевича, Ф. Г. Гунько, Ц. Е. Мирцхулавы, С. К. Кузнецова, Т. П. Проворовой, Н. Н. Беляшевского и др. [4]

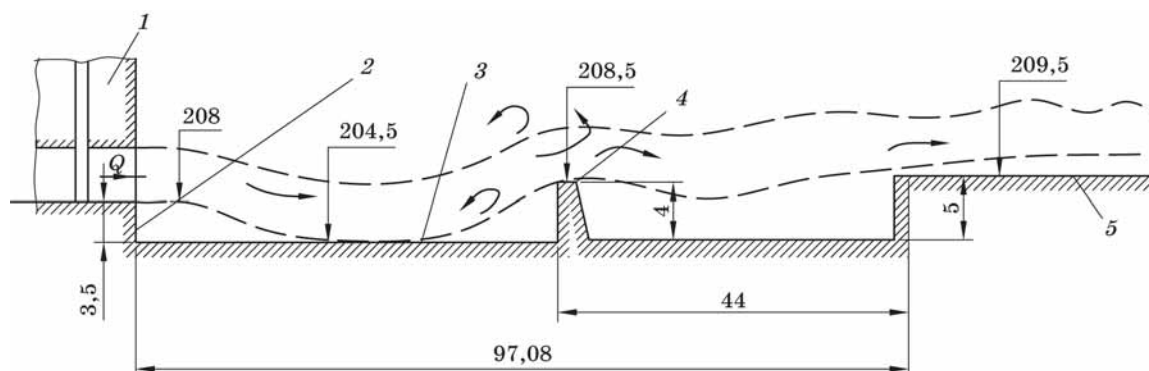


Рис. 3. Продольный разрез конструкции нижнего бьефа донного туннельного водовыпуска-водосброса Юмагузинского гидроузла на стадии рабочих чертежей: 1 — выходной оголовок; 2 — уступ; 3 — водобойный колодец; 4 — водобойная стенка; 5 — рисберма

### Выводы

При проектировании водопропускных сооружений, включая водосбросные, водохранилищных гидроузлов I и II классов на стадии ТЭО необходимо проводить лабораторные научные исследования с целью учета влияния всех факторов. Учет результатов экспериментальных научных исследований на стадии рабочего (технического) проекта позволяет ввести коррективы в конструктивные решения гидротехнических сооружений, тем самым повысить их гидравлическую безопасность и надежность в целом.

При проектировании входной части паводковых открытых водосбросов-быстротоков рекомендуется рассматривать комбинацию водосливных отверстий, работающих в регулирующем режиме (с затворами) и в автоматическом (без затворов) с отметкой дна на входе на уровне нормального подпертого уровня или несколько ниже.

При рассмотрении конструктивного решения водоската-лотка быстротока необходимо назначать количество участков по длине с различными уклонами или с одним в зависимости от топографических (геодезического перепада) и геологических условий, принимая во внимание величину средних и придонных скоростей не более 20 м/с. Превышение скоростей на водоскате больше этой величины может спровоцировать кавитационные явления (осо-

бенно при наличии переменных уклонов), которые могут привести к разрушению бетонного крепления.

Для снижения скоростей на водоскате следует принимать во внимание величину удельных расходов, которые не должны превышать 25...30 м<sup>2</sup>/с.

Скорость на водоскате (в лотке быстротока) может быть снижена проектированием на его дне усиленной (повышенной) шероховатости, причем не по всей длине водоската, а начиная с сечения, в котором средняя скорость потока близка или равна 20 м/с.

Не рекомендуется проектировать водоскат (лоток) с расширяющимся концевым участком, так как экспериментальные исследования показали, что поток, движущийся по лотку с большой скоростью, не способен к эффективному перераспределению по ширине.

Для оптимального сопряжения потока, выходящего с водоската (лотка), целесообразно проектировать расширяющийся в плане водобой.

При аллювиальном грунтовом отложении основания водобоя наиболее эффективным является сопряжение дна лотка с дном водобоя с помощью водобойного колодца, расширяющегося в плане.

Устройство в водобойном колодце дополнительных гасительных устройств (водобойной сплошной стенки, шашек, пирсов, растекателей и др.) значительно снижает эффект гашения энергии за счет гидравлического прыжка, т.е. он

практически не формируется.

При расчете рисбермы необходимо принимать во внимание не только среднюю по течению скорость, но также фактические придонные среднестатистические и максимальные значения скорости однопроцентной обеспеченности, а также затухание интенсивности турбулентности. Только лабораторные исследования позволяют для каждого конкретного сооружения определить эти скоростные характеристики.

#### Список литературы

1. Совершенствование конструкций крепления водосбросных сооружений на оросительных системах Ставропольского края [Текст] : отчет о НИР (заключительный) : 729 / Новочерк. гос. мелиор. акад. ; рук. Белоконов Е. Н. ; исполн. Абраменко П. И. — Новочеркасск, 1986. — 72 с.
2. Реконструкция головного сооружения Невинномысского канала. Аварийно-восстановительные работы по ликвидации последствий паводка на реке Кубань по земляной плотине и струенаправляющей дамбе Невинномысского канала [Текст] : отчет о НИР (промежуточ.) / Новочерк. гос. мелиор. акад. ; рук. Волосухин В. А. ; исполн. Белоконов Е. Н. [и др.]. — Новочеркасск, 2003. — 120 с.
3. Экспериментальные исследования дополнительного водосбора на головном сооружении Усть-Джегубинского гидроузла [Текст] : отчет о НИР (промежуточ.) : 301 / Новочерк. гос. мелиор. акад. ; рук. Волосухин В. А. ; исполн. Белоконов Е. Н. [и др.]. — Новочеркасск, 2006. — 133 с.
4. Исследования сооружений Юмагузинского узла на реке Белой в Башкортостане. Разд. 2. Гидравлические исследования пропускной способности и сопряжения бьефов паводкового водосброса и донного водовыпуска [Текст] : отчет о НИР (промежуточ.) : 162 / Новочерк. гос. мелиор. акад. ; рук. Шкура В. Н. ; исполн. Бондаренко В. Л. [и др.]. — Новочеркасск, 2000. — 282 с.
5. **Бондаренко, В. Л.** К вопросу обеспечения гидравлической безопасности водосбросных и водопропускных сооружений [Текст] / В. Л. Бондаренко, Е. Н. Белоконов // Изв. вузов Сев.-Кавк. регион. техн. науки. — 2004. — № 1. — С. 89–91.
6. Основные факторы учета пропускной способности гидроузлов при декларировании их безопасности [Текст] / С. Ф. Бобков [и др.] // Гидротехническое строительство. — 1999. — № 4.
7. **Железняков, Г. В.** Гидротехнические сооружения. Справочник проектировщика [Текст] / Г. В. Железняков [и др.] ; под ред. В. П. Недриги. — М. : Стройиздат, 1983. — 544 с.
8. **Belbachir, K.** Evacuateur de crue du barrage AL' IBTISSAM (Alge'rie) / K. Belbachir, R. Lafitte [Text] // Troizieme Congres des Grands Barrages. — New Delli, 1979.
9. **Большаков, В. А.** Справочник по гидравлике. — 2-е изд., перераб. и доп. [Текст] / В. А. Большаков [и др.] ; под ред. В. А. Большакова. — Киев: Вища школа, 1984. — 343 с.  
Материал поступил в редакцию 10.03.2008.

**Волосухин Виктор Алексеевич**, доктор техн. наук, профессор, проректор по научно-исследовательской работе

Тел. 8 (86352) 2-41-64

E-mail: volosukhin@yandex.ru

**Белоконов Евгений Никитович**, канд. техн. наук, профессор, зав. кафедрой строительного дела, оснований и фундаментов

Тел. 8 (86352) 2-41-64

E-mail: magnet.ru