

ды картографирования; под ред. Ю. Ф. Книжникова. – М.: Изд-во МГУ, 1995. – 240 с.

8. Изображения Земли из космоса: примеры применения. – М.: ООО Инженерно-технологический центр «Сканэкс», 2005. – 100 с.

Материал поступил в редакцию 20.06.13.

**Козлов Дмитрий Вячеславович**, доктор технических наук, профессор, ректор

Тел. 8 (499) 976-29-62

E-mail: kozlovdu@mail.ru

**Фролова Наталья Леонидовна**, доктор

географических наук, профессор

Тел. 8 (495) 939-15-33

E-mail: frolova\_nl@mail.ru

**Агафонова Светлана Андреевна**, кандидат географических наук, инженер

Тел. 8 (495) 939-15-33

E-mail: hydro.msu@gmail.com

**Савельев Константин Леонидович**, ведущий инженер

Тел. 8 (903) 541-87-92

E-mail: savelevkl@mail.ru

УДК 502/504:627.83

**И. С. РУМЯНЦЕВ, НАНЬ ФЭН**

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Московский государственный университет природообустройства»

## **ОСОБЕННОСТИ ГАШЕНИЯ ИЗБЫТОЧНОЙ ЭНЕРГИИ ПОТОКА В НИЖНИХ БЬЕФАХ ВЫСОКОПОРОГОВЫХ БЕТОННЫХ ВОДОСБРОСНЫХ ПЛОТИН ПРАКТИЧЕСКОГО ПРОФИЛЯ С НИЗОВОЙ СТУПЕНЧАТОЙ СЛИВНОЙ ГРАНЬЮ**

*Представлены различные конструкции водосбросов практического профиля со ступенчатой низовой сливной гранью, а также приведены новые результаты модельных гидравлических исследований таких водосбросов.*

*Водосброс со ступенчатой низовой сливной гранью, кинетическая энергия, водослив практического профиля.*

*There are presented different designs of round-crested weirs with a stepped lower spillway face as well as there are given new results of simulation hydraulic studies of such weirs.*

*Weir with a stepped lower spillway face, kinetic energy, round-crested weir.*

По данным археологов, ступенчатые водосливные плотины строились уже в Древнем Египте более 5000 лет назад [1]. Примером может служить плотина The Barrier of Raas в 30 км от Каира, которая разрушилась во время первого же паводка из-за фильтрационных деформаций грунтов основания. Этот первый зафиксированный неудачный опыт строительства ступенчатой плотины надолго задержал прогресс плотиностроения в Египте, хотя ее конструкция удачно решала весь комплекс необходимых задач: совмещение водопропускного и водоподпорного сооружений, гашение избыточной энергии потока, автоматизацию работы, экономичность. Тем не менее такая конструкция плотин имеет относительно богатый мировой опыт при-

менения. Их строили в Древней Греции, Древнем Риме, странах Ближнего Востока, Испании, в России [2]. Повышенный интерес к ступенчатым водосливным плотинам, возникший в последние годы, связан с прогрессом в технологии их возведения.

Ступенчатой может выполняться как водосливная поверхность бетонных плотин, так и водосбросов, устраиваемых на низовом откосе грунтовых плотин. В настоящее время практически сняты ограничения в применении конструкции по высоте, значительно возросли пропускаемые удельные расходы воды (до 60 м<sup>2</sup>/с) грунтовых, ступенчатых водосливных плотин, не говоря уже о бетонных плотинах. Ступенчатая водосливная поверхность водосбросного сооружения не только эффективно гасит кинети-

ческую энергию сбрасываемого потока, но и устраняет кавитационные явления на водосливе при пропуске воды с большой скоростью.

Возведение таких плотин, устройство ступеней современным методом из укатанного бетона помимо гидравлически выгодных условий работы снижает капитальные затраты на строительство порой до 40 %.

Модели исследованных авторами бетонных высокопороговых плотин имели разную высоту тела: 170 см (вакуумный водослив практического профиля, поперечное сечение которого было выполнено по координатам, рекомендованным Н. П. Розановым, СССР), 192 см (безвакуумный водослив практического профиля, построенного по координатам Кригера–Офицера, СССР), 196 см (безвакуумный водослив практического профиля, очерченного по координатам WES, США). Все модели были выполнены в масштабе 1:60 (рис. 1...4).

Для удовлетворения условий работы оголовка водослива в вакуумном режиме значения очертаний его «фиктивного радиуса» устанавливались в соответствии с рекомендациями Н. П. Розанова, т. е. при расходах  $Q \geq 100$  л/с отношение составляло  $H_0/r_\phi \approx 1,2...3,4$  ( $H_0$  – напор с учетом скорости подхода;  $r_\phi$  – фиктивный радиус, равный 0,1 м), эллиптический оголовок с вакуумным профилем с соотношением полуосей эллипса  $a/b = 1$  (см. модель *a* на рис. 1...4). При построении очертаний поперечного сечения водослива по координатам Кригера–Офицера его профилирующий (расчетный) напор был равен 30 см (см. модель *б* на рис. 1...4) [3].

При построении очертаний поперечного сечения водослива по координатам WES его координаты были определены при расчетном (профилирующем) напоре 30 см. Проектирование такого профиля велось по следующей формуле:  $x^{1,85} = 2H^{0,85}y$  ( $H$  – расчетный напор;  $x$  и  $y$  – горизонтальная и вертикальная оси соответственно, проведенные из центра на гребне водосброса) (см. модель *в* на рис. 1...4) [4].

Угол наклона низовой (сливной) грани был равен  $\Psi = 47^\circ$ . Водосбросы со ступенчатой низовой гранью имели ступени различных размеров: две первые от оголовка ступени имели высоту  $d = 3,6$  см и ширину  $l = 3$  см; затем шли две ступени с  $d = 5,52$  см и  $l = 4,6$  см. Остальные ступени имели размеры  $d = 7,32$  см,  $l = 6,1$  см, причем отношение  $d/l$  у всех ступеней

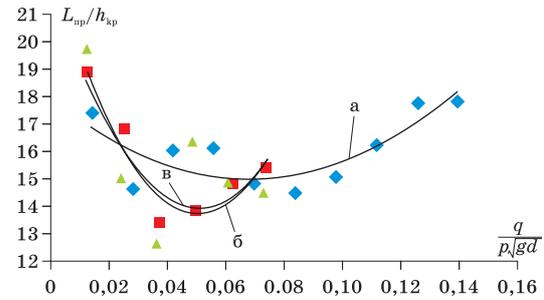


Рис. 1. Изменение относительной длины гидравлического прыжка в зависимости от относительного удельного расхода на водосбросных плотинах со ступенчатой низовой сливной гранью различных конструкций

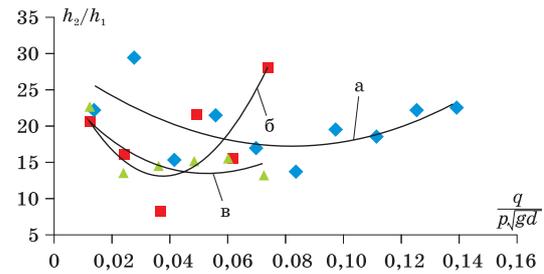


Рис. 2. Изменение относительной глубины гидравлического прыжка в зависимости от относительного удельного расхода на водосбросных плотинах со ступенчатой низовой сливной гранью различных конструкций

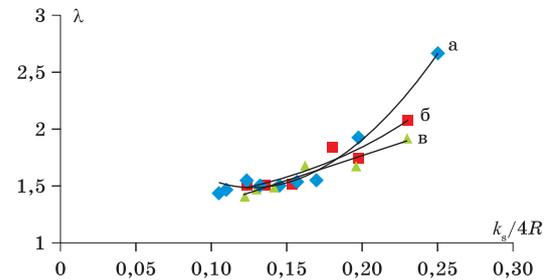


Рис. 3. Изменение коэффициента гидравлического трения высокопороговых ступенчатых водосбросных плотин со ступенчатой низовой водосливной гранью различных конструкций

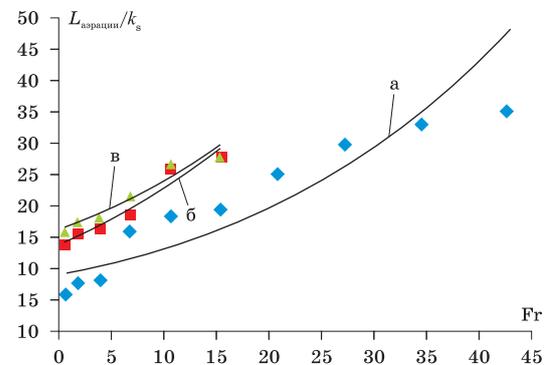


Рис. 4. График зависимости положения точки начала вовлечения воздуха от числа Фруда, вычисленного по эквивалентной шероховатости, где  $k_s = d \cos \alpha$  – эквивалентная шероховатость,  $Fr = q^2/g \sin \alpha k_s^3$  – число Фруда, определенное применительно к выступу шероховатости

равнялось 1,21. Смена же скользящего и перепадного режимов наблюдалась при отношении критической глубины к высоте ступени  $h_{кр}/d = 0,47...1,55$ , длина ступени низовой грани составляла  $L_{ступени} = 2,27$  м, что практически совпало с данными других исследователей. Расходы же, в свою очередь, менялись в диапазоне от 20 до 120 л/с (модели *б* и *в* – при расходе 20, 40, 60, 80, 100, 120 л/с, модель *а* – при расходе 20, 40, 60, 80, 100, 120, 140, 160, 180, 200 л/с) и измерялись с помощью треугольного водослива. Пропуск расходов и установка уровней проводились с учетом инерционности всей системы.

Результаты исследованных параметров совершенных гидравлических прыжков на физических моделях водосбросов практического профиля со ступенчатой низовой сливной гранью и схемы проведения опытов были следующими. При различных расходах с помощью затвора «жалюзи», имевшегося в концевой части лотка, за моделью водослива, создавался гидравлический прыжок в критическом сечении, т. е. первая сопряженная глубина совпадала со сжатым сечением, а сам прыжок начинался сразу за водосливом. В этом сечении и в конце водобоя замерялись глубины потока и длина гидравлического прыжка. Таким образом, исследовались водосливные пороги всех трех типов *а*, *б*, *в*. Результаты исследований по сравниваемым конструкциям представлены на рисунках 1. и 2. Это варианты изменения относительной длины и относительной глубины совершенного гидравлического прыжка в зависимости от относительного удельного расхода.

Как видно из рисунка 1, в диапазоне  $0,024 \leq q/(g^{0,5}d^{0,5}p) \leq 0,068$  (где  $q$  – удельный расход воды;  $p$  – высота водосброса) кривая изменения относительной длины гидравлического прыжка в зависимости от относительного удельного расхода для модели *а* располагается выше, чем кривая для модели *в*, а ниже всех располагается кривая для модели *б*. Во всех исследованных водосбросах кривые изменений вышеназванных относительных длин гидравлических прыжков в опытах с моделями *б*, *в* находились гораздо ближе.

Как следует из рисунка 2, кривая изменения относительной глубины гидравлического прыжка в зависимости от относительного удельного расхода для модели *а* располагается выше, чем кривая для моде-

ли *в*. В диапазоне  $0,012 \leq q/(g^{0,5}d^{0,5}p) \leq 0,044$  ниже всех располагается кривая для модели *б*. В диапазоне  $0,044 \leq q/(g^{0,5}d^{0,5}p) \leq 0,076$  между кривыми для моделей *а* и *в* располагается кривая для модели *б* (см. рис. 2).

Одной из основных инженерных задач, связанных с расчетом искусственной шероховатости, является определение коэффициента гидравлического трения высокоскоростного потока. В свое время подбор искусственной шероховатости рекомендовалось производить, используя данные П. И. Гордиенко, полученные в результате экспериментальных исследований гидравлических сопротивлений в открытых каналах с различными видами шероховатости. Эти исследования были посвящены изучению сопротивления высокоскоростных потоков. В нашем случае моделирования, когда уклон водосливной поверхности обозначен  $i$ , глубины потока –  $h$ , скорости потока –  $v$ , коэффициент гидравлического трения –  $\lambda$  определяется по формуле Дарси:

$$\lambda = 8gb^2h^3i/Q^2 = 8gh^3i/q^2 = 8ghi/v^2,$$

где  $b$  – ширина водосброса.

Эта формула имеет ряд преимуществ по сравнению с формулой Шези: она применима и вне области квадратичного сопротивления, коэффициент  $\lambda$  – величина безразмерная. По формуле Дарси потери напора выражаются в зависимости от величины скоростного напора. Для оценки величины коэффициента гидравлического сопротивления были построены графики  $\lambda = f(K_s/4R)$  на рис. 3, где  $K_s = d \cos \alpha$  – эквивалентная шероховатость.

Как видно из рисунка 3, кривая изменения коэффициента гидравлического трения для модели *а* располагается выше, чем кривая для модели *б*. Ниже всех располагается кривая для модели *в*. В диапазоне  $0,1 \leq K_s/4R \leq 0,2$  во всех исследованных водосбросах кривые изменений вышеназванных коэффициентов гидравлического трения в опытах с моделями *а*, *б*, *в* находились гораздо ближе.

Как известно, режим течения потока на сливных гранях исследованных водосбросных плотин может быть подразделен на два основных типа: перепадный (струйный) и скользящий (быстроточный) [1]. Наблюдения самих режимов и фиксирование их смены в проведенных опытах осуществлялось на трех моделях: *а*, *б*, *в* (см. рис. 4).

Во время экспериментов было обнаружено, что параметр  $L_{аэрации}$ , как и смена

режимов течения, зависит от размеров ступеней и пропускаемых расходов ( $L_{\text{аэрации}}$  – расстояние от наивысшей точки подъема гребня водосброса до точки, где граница турбулентного пограничного слоя выходит на свободную поверхность). На этом расстоянии поток остается относительно «чистым», прозрачным по глубине. Вниз по течению происходит интенсивный захват воздуха и «распухание» потока по глубине. В свою очередь, по мере увеличения расхода длина  $L_{\text{аэрации}}$  увеличивается в сторону нижнего бьефа.

Как видно из рисунка 4, кривая зависимости положения точки начала вовлечения воздуха в зависимости от числа Фруда, вычисленного по эквивалентной шероховатости, для модели *в* располагается выше, чем кривая для модели *б*. Ниже всех располагается кривая для модели *а*. В диапазоне  $10 \leq Fr \leq 15$  во всех исследованных водосбросах кривые изменений чисел в опытах с моделями *б, в* находились гораздо ближе.

#### Выводы

В диапазоне  $0,024 \leq q/(g^{0,5}d^{0,5}p) \leq 0,068$  кривая изменения относительной длины гидравлического прыжка  $L_{\text{кр}}/h_{\text{кр}}$  в зависимости от относительного удельного расхода  $q/(g^{0,5}d^{0,5}p)$  для водосброса со ступенчатой низовой гранью с вакуумным оголовком, очерченным по координатам, рекомендуемым Н. П. Розановым (модель *а*), располагается выше, чем кривая для водосброса со ступенчатой низовой гранью с безвакуумным оголовком, выполненным по координатам WES (модель *в*). Кривая для водосброса со ступенчатой низовой гранью с безвакуумным оголовком по координатам Кригера–Офицерова (модель *б*) располагалась ниже всех. Во всех исследованных водосбросах кривые изменений вышеназванных относительных длин гидравлических прыжков в опытах с моделями *б, в* находились гораздо ближе.

Кривая изменения относительной глубины гидравлического прыжка в зависимости от относительного удельного расхода  $h_2/h_1 = f(q/(g^{0,5}d^{0,5}p))$  для водосброса со ступенчатой низовой гранью с вакуумным оголовком по координатам, рекомендуемым Н. П. Розановым (модель *а*), располагается выше, чем кривая для водосброса со ступенчатой низовой гранью с безвакуумным оголовком по координатам WES (модель *в*). В диапазоне  $0,012 \leq q/(g^{0,5}d^{0,5}p) \leq 0,044$  ниже всех

располагается кривая для водосброса со ступенчатой низовой гранью с безвакуумным оголовком по координатам Кригера–Офицерова (модель *б*). В диапазоне  $0,044 \leq q/(g^{0,5}d^{0,5}p) \leq 0,076$  между кривыми для водосбросов со ступенчатой низовой гранью с вакуумным оголовком по координатам, рекомендованным Н. П. Розановым (модель *а*), и со ступенчатой низовой гранью с безвакуумным оголовком по координатам WES (модель *в*) располагается кривая для водосброса со ступенчатой низовой гранью с безвакуумным оголовком по координатам Кригера–Офицерова (модель *б*).

При исследовании всех моделей по мере увеличения значений отношения  $K_s/4R$  кривая  $\lambda = f(K_s/4R)$  имеет восходящий характер, т. е. величины  $\lambda$  увеличивались. Кривая изменения коэффициента гидравлического трения для водосброса со ступенчатой низовой гранью с вакуумным оголовком по координатам, рекомендованным Н. П. Розановым (модель *а*), располагается выше, чем кривая для водосброса со ступенчатой низовой гранью с безвакуумным оголовком по координатам Кригера–Офицерова (модель *б*). Ниже всех располагается кривая для водосброса со ступенчатой низовой гранью с безвакуумным оголовком по координатам WES (модель *в*). В диапазоне  $0,1 \leq K_s/4R \leq 0,2$  во всех исследованных водосбросах кривые изменений вышеназванных коэффициентов гидравлических трений в опытах с моделями *а, б, в* находились гораздо ближе.

Как видно из рисунка 4, самое краткое расстояние  $L_{\text{аэрации}}$  от точки наивысшего подъема гребня водосброса до точки начала аэрации, где происходит интенсивный захват воздуха и разбухание потока по глубине, имеет место в случае со ступенчатой низовой гранью с вакуумным оголовком, выполненным по координатам, рекомендованным Н. П. Розановым.

Проведенные авторами исследования показали, что с точек зрения наибольшей интенсификации процесса аэрации потока на ступенчатой части сливной грани и создания наиболее короткого и экономичного водобоя предпочтительнее других выглядит конструкция водосброса со ступенчатой низовой гранью с безвакуумным оголовком по координатам WES.

1. The oldest dam in the world // La Hoille Blanche. – 1952. – Mai-Juin.

2. Шарп Дж. Гидравлическое модели-

рование. – М.: Мир, 1984. – 280 с.

3. Штеренлихт Д. В. Гидравлика: учебник для вузов. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 640 с.

4. Zhao J., Zhe J. Hydraulics. – China: WaterPower Press, 2007. – 350 p.

Материал поступил в редакцию 15.05.13.

**Румянцев Игорь Семенович**, доктор технических наук, профессор, заслужен-

ный деятель науки РФ, заведующий кафедрой «Гидротехнические сооружения»

Тел. 8 (499) 976-24-60

E-mail: rummyantsev.rumi@yandex.ru

**Нань Фэн**, магистр техники и технологий, аспирант

Тел. 8 (965) 422-71-46

E-mail: nanfeng@yandex.ru

УДК 502/504:627.83

**Н. Н. РОЗАНОВА**

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Московский государственный университет природообустройства»

## К ВОПРОСУ МОДЕЛИРОВАНИЯ ЗАКРУЧЕННЫХ ПОТОКОВ В ВИХРЕВЫХ ВОДОСБРОСНЫХ СООРУЖЕНИЯХ

*Изложены принципы физического моделирования водосбросных сооружений, работающих в условиях пропуска закрученного потока. Дана практическая рекомендация по моделированию вихревых водосбросов при поступлении аэрированного потока в водовод с закрученным потоком.*

*Закрученный поток, ядро закрученного потока, водяное кольцо закрученного потока, параметр закрутки потока, геометрический параметр завихрителя потока, воздухозахват, воздухосодержание, критерии подобия, аэрационная шахта.*

*There are stated principles of physical simulation of the spillways working under the conditions of swirling flow passage. There is given a practical recommendation on simulation of swirling spillways under the aerated flow entering into a water conduit with a swirling flow.*

*Swirling flow, swirling flow core, water ring of swirling flow, flow swirling parameter, geometric parameter of flow swirler, air entrapment, air content, criteria of similarity, aeration shaft.*

При проектировании водосбросных и сопрягающих сооружений, работающих в условиях пропуска закрученных потоков, не всегда в полной мере можно применять известные методики гидравлического расчета параметров закрученного потока [1, 2, 3 и др.]. Многообразие конструкций вихревых водопропускных сооружений (водосбросов, сопрягающих напорных сооружений, ливне-спусков и проч.) и условий их работы вынуждает прибегать к физическому моделированию рассматриваемых сооружений.

Закрученный поток создается так называемыми «закручивающими устройствами». Наиболее простой конструкцией является тангенциальный завихритель потока [4 и др.]. Тангенциальный завихритель потока применен в вихревых

водосбросах гидроузла Тери (Индия) и Компоса (КНР), а также предлагался для внедрения на Туполангском (Узбекистан), Рогунском (Таджикистан), Тельмамском (РФ) и Лидзяся (КНР) гидроузлах.

Основными критериями подобия в моделировании закрученных потоков являются:  $Fr = idem$ ,  $Eu = idem$  и  $Re = idem$ . Дополнительно для гидродинамического подобия требуется также соблюдение геометрической пропорциональности потока [1]:

$$r_{я} / R = idem, \quad (1)$$

где  $r_{я}$  – радиус ядра потока;  $R$  – радиус потока;

$$Eu = p_{я} / \rho \varphi^2 2gH = \chi_{я} / 2\varphi^2, \quad (2)$$

где  $p_{я}$  – давление в ядре;  $\chi_{я}$  – относительное давление (вакуум) в ядре.

Следовательно,  $\chi_{я} = idem$  [1].