

Крепление дна в составе низконапорного водопропускного сооружения, возводимого наплавным способом

Д.т.н., профессор А.Е. Андреев,
 ФГБОУ ВПО Санкт-Петербургский государственный политехнический университет;
к.т.н., ученый секретарь Т.В. Иванова,*
 ОАО «ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева»

Ключевые слова: крепление дна; управление околоскритическими потоками; совершенствование технологий; направляющие элементы

Вопросы совершенствования технологии возведения гидротехнических сооружений и креплений дна в их составе сегодня являются весьма актуальными. Создание новых, более современных технологий возведения гидротехнических сооружений требует разработки новейших конструкций креплений дна и регулирующих элементов в их составе.

Часто встречаемые низконапорные водопропускные сооружения, эксплуатируемые в границах перепадов от 1,5 м до 5,0 м, отличаются околоскритическим режимом сопряжения бьефов: в нижнем бьефе не формируется совершенный гидравлический прыжок. В этом случае режим течения в нижнем бьефе отличается формированием волнистого гидравлического прыжка [1], представленного на рис.1.

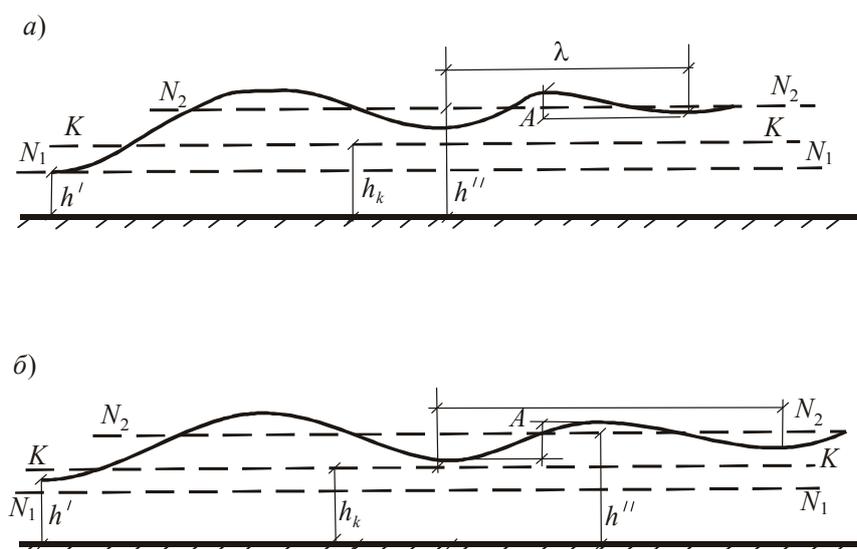


Рисунок 1. Виды свободного волнистого гидравлического прыжка:
 а) в виде затухающих волн; б) в виде периодических волн

Течения такого рода отличаются наличием волнистой поверхности и большой размывающей способностью [2]. Анализ литературных источников [3-6] показал, что для таких потоков существующие методы гашения избыточной водной энергии малоэффективны и требуют доработки и совершенствования. Данные факты указывают на новизну проведенных нами исследований по совершенствованию конструкций крепления дна и технологии их возведения.

Экспериментальные исследования конструкции крепления

Гидравлические исследования по этой тематике проводились для обоснования строительства водопропускного сооружения В-2 и судопропускного сооружения С-1 в составе защитных сооружений Санкт-Петербурга от наводнений. Они были выполнены во ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева на размываемых моделях с использованием [3-4].

Известно [7], что при малых перепадах между УФЗ (уровнем Финского залива) и УНГ (уровнем Невской губы) до 0.5 м размыв дна незначительный, крепление дна по обе стороны защитных сооружений может быть ограничено каменной наброской с $d_{cp} \approx 0,15+0,20$ м. Однако в случае аварийного незакрытия одного из затворов в период паводка (наводнения) картина существенно меняется.

Андреев А.В., Иванова Т.В. Крепление дна в составе низконапорного водопропускного сооружения, возводимого наплавным способом

Результаты показали, что, несмотря на разнообразие набросных типов креплений дна, за гладким бетонным креплением в нижнем бьефе формировалась воронка размыва глубиной до $2h_k + 3h_k$. При максимальной величине удельного расхода $q_p = 40 \text{ м}^3/\text{пог.м}$ наблюдался разнос концевого крепления.

Указанное обстоятельство привело к продолжению исследований с целью получения конструкций крепления дна, обладающих высокой регулирующей способностью. Исследования проводились при околокритическом режиме сопротивления бьефов, формирующемся при перепадах $Z \geq 3\text{м}$ по типу волнистого гидравлического прыжка [8].

Следует иметь в виду, что при разработке проекта защитных сооружений перед проектировщиками и исследователями встал вопрос: каким требованиям должны удовлетворять крепления дна за водопропускными сооружениями, возводимыми в широкой морской акватории, в границах такого крупного мегаполиса, как Санкт-Петербург? Заложенные общепринятые требования к работе водопропускных сооружений предполагают, что элементы крепления нижнего бьефа несут разную степень нагрузки в процессе сопряжения бьефов [9]. Акцент делается на гашение избыточной энергии потока в границах водобойной части крепления, а рисберма и концевое устройство рассматриваются как пассивные участки, обеспечивающие процесс управления путем естественной диссипации энергии на послепрыжковом участке водопропускного тракта [10]. При этом допускается образование местных воронок размывов в границах концевого устройства и не допускается повреждение бетонных частей крепления.

В условиях работы защитного комплекса такой подход не мог быть полностью оправдан, так как наличие каких-либо значительных размывов при достаточно высокой степени загрязнения водной акватории способствовало бы осаждению (накоплению) частиц тяжелых металлов (Pb, Zn, Cu). Эти частицы в виде донных отложений впоследствии могли бы разноситься по всей акватории Невской Губы, создавая опасность вторичного загрязнения и ухудшая тем самым экологическую обстановку.

Это обстоятельство также потребовало разработки принципиально новых схем управления, позволяющих в условиях расчетного околокритического режима сопряжения ($0,70 \leq Fr \leq 0,85$) обеспечить сохранение концевого устройства как элемента крепления, без формирования развитых воронок размыва [11].

Невозможность численно оценить все факторы, влияющие на формирование течений в условиях управляемого процесса диссипации, и определить составляющие в управлении пространственного сопряжения бьефов заставила авторов прибегнуть к широкому использованию экспериментальных данных, а также зависимостей гидромеханики и волновой теории там, где это представлялось возможным [12,13].

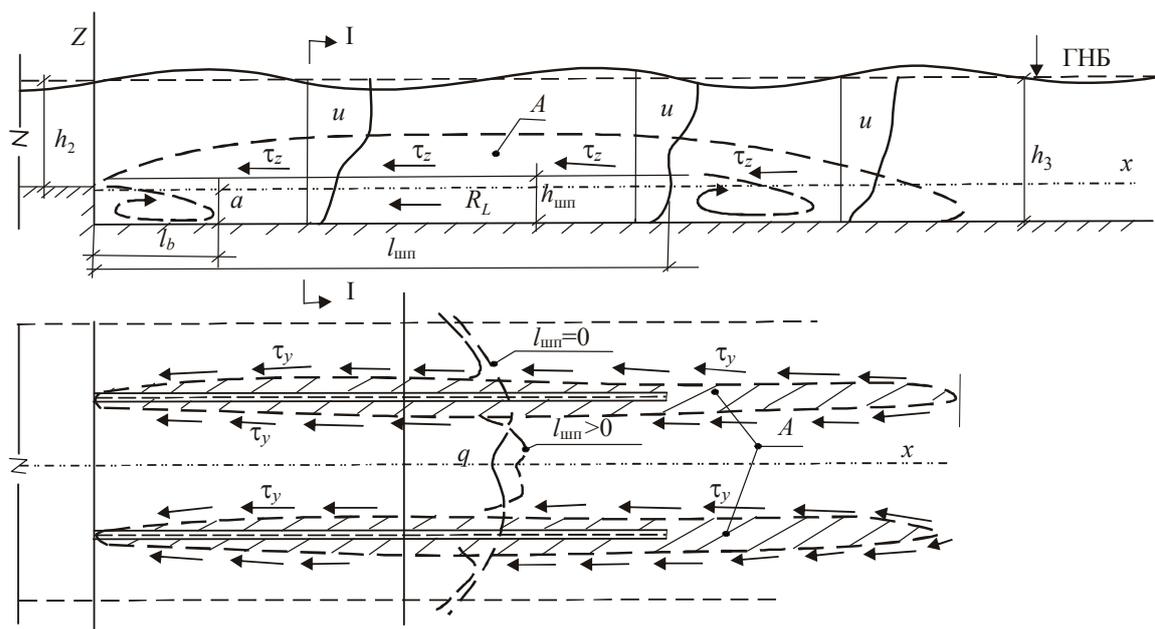
Исследования показали, что гладкая рисберма с прямым уступом дна может рассматриваться как база для разработки конструкции с управляемым процессом диссипации энергии. Область поперечного тока в границах вальца за уступом дна, являясь водопроводящим трактом для присоединяемой извне (со стороны боковых водоворотных областей) водной массы $\Delta Q/Q$, несмотря на малые объемы ($\Delta Q/Q = 0,02 + 0,03$), может влиять на изменение формы течения в плане и по глубине. Это изменение происходит обычно на относительно коротком расстоянии ($\approx 5 + 7h_k$) и проявляется уже в границах вальца. Однако при увеличении перепадов бьефов более одного метра такая конструкция недостаточно эффективна.

На следующем этапе исследования [8] с целью ограничения величин циркуляционных процессов в придонной области течения (за уступом дна) и выравнивания характеристик потока в плане была предложена к рассмотрению конструкция рисбермы с продольными направляющими шпорами (стенками), располагаемыми на высоту уступа на участке заглубленной части крепления дна (рис. 2).

С учетом наблюдающегося характера циркуляционных процессов и форм течения было признано целесообразным расположить не менее чем по два элемента на одно водопропускное отверстие, устанавливая их по обе стороны от оси отверстия на расстоянии, равном $1/4$ его ширины. Таким образом, обеспечивается возможность влияния на процесс поперечной циркуляции по длине направляющих элементов при одновременном торможении потока в придонной области. При этом регулирующей эффект будет включать в себя:

- торможение потока по высоте направляющих элементов, сопровождающееся гашением части избыточной энергии потока и перераспределением водной массы ($Q + \Delta Q$) в плане и по глубине;

- ориентацию динамической оси потока в придонной области вдоль направляющих элементов, что определяет его устойчивое положение в нижнем бьефе;
- ограничение поперечной циркуляции на участке заглубленной части крепления.



**Рисунок 2. Конструкция рисбермы с продольными направляющими шпорами (стенками):
А – зона интенсивного турбулентного перемешивания**

Численные значения величин сопротивления (R_L) вдоль направляющего элемента длиной $L_{шв}$ и высотой $h_{шп}$ были получены с использованием [14-15] на основании анализа уравнения Навье-Стокса для случая двухстороннего обтекания пластины потоком:

$$R_L = 0,67\alpha_F h_{шп} \sqrt{\mu\rho(\alpha_{mv} U_R)^3} \int_0^{l_{шп}} \frac{dx}{\sqrt{x}}, \quad (1)$$

где α_F – коэффициент площади обтекания;
 α_{mv} – коэффициент количества движения;
 $U_R = (0,3 \div 0,9)U$ – скорость обтекания;
 μ и ρ – вязкость и плотность жидкости.

В общем виде дифференцированный подход к процессу управления течениями в границах расчетной схемы крепления дна может складываться на основании составляющих:

- а) высоты направляющего элемента ($h_{шп}$), в том числе относительно высоты уступа дна ($h_{шп}/a$);
- б) длины направляющего элемента ($l_{шп}/h_k$), в том числе с учетом его выхода за границы заступного вальца;
- в) скорости обтекания направляющего элемента потоком в придонной области (за уступом дна), т.е. U_R/\bar{U} .

Избирательные возможности данного типа креплений были отмечены нами при выполнении комплекса исследований на пространственной гидравлической модели крупного судопропускного сооружения в составе защитного комплекса. Наличие протяженных регулирующих сооружений, выходящих за границы пограничного слоя на дне, позволило рассматривать конструкцию как дополнительное гидравлическое сопротивление, регулирующее величину пропускного расхода в зависимости от начальных параметров процесса сопряжения. Так, при росте величины z/h_k от 0,025 до 0,23 (см. рис. 3) наблюдался рост величин гидравлических сопротивлений, сопровождающийся снижением величин пропускаемого расхода соответственно от 3% до 32% в зависимости от конструктивных особенностей крепления ($h_{шп}/h_k$, $l_{шп}/h_k$). Дальнейшее увеличение $z/h_k > 0,2$ не повлекло за собой адекватного снижения величины пропускаемого расхода (Q), что говорит о сформировавшейся в данной схеме водопропускного тракта стабилизации режима течения ($U_{дон} \approx const$) в придонной области.

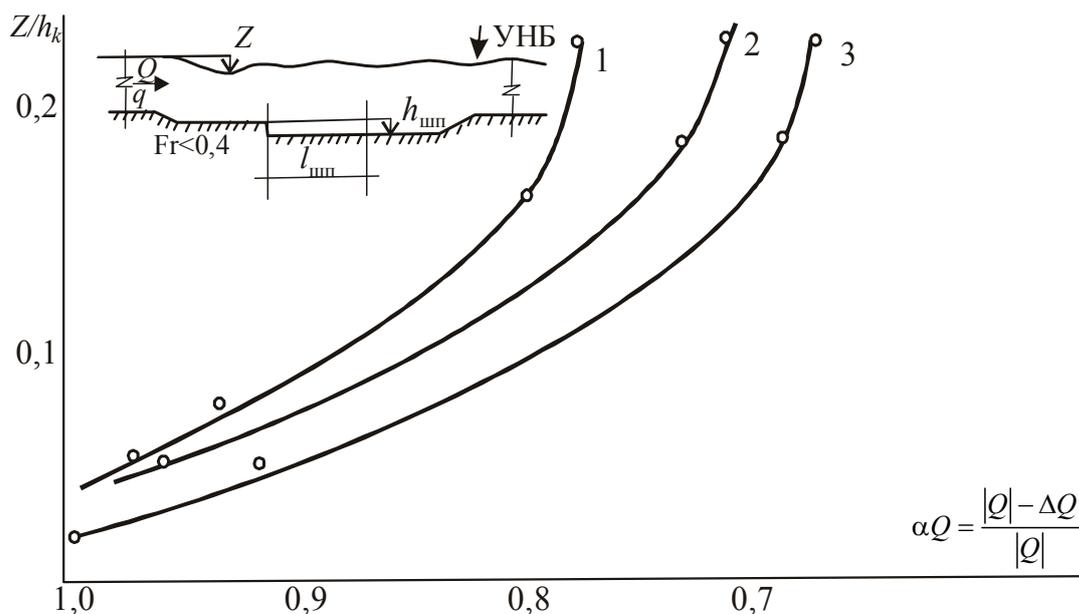


Рисунок 3. Изменение величины α_Q за судопропускным сооружением при изменении относительных размеров направляющих стенок:

1 – $l_{шп}/h_k = 7$, $h_{шп}/h_k = 0,2$; **2** – $l_{шп}/h_k = 9$, $h_{шп}/h_k = 0,2$; **3** – $l_{шп}/h_k = 9$, $h_{шп}/h_k = 0,3$

В целом, предложенная конструкция с направляющими стенками позволила уменьшить глубину ямы размыва в 2-3 раза и оказалась более эффективной, чем вариант гладкой рисбермы с уступом. Однако при принятии решения в период проектирования и строительства защитных сооружений не была разработана технология возведения конструкции. В настоящей работе предлагается технология, разработанная с использованием ранее проведенных исследований [16-17], направленная на повышение безопасности конструкции крепления [18].

Технология возведения

С целью недопущения размыва дна и упрощения монтажа направляющих элементов за основу конструкции была взята сборная Т-образная форма.

Подобного вида конструкция крепления может выполняться по разным технологиям, в том числе наплавным способом без осушения котлована. Использование понтонов в данном случае решает две задачи: транспортировку и установку на заранее подготовленное основание. В последнюю очередь ведется отсыпка песчано-гравийной смеси и камня.

Направляющие элементы Т-образного профиля могут выполняться составными из двух элементов: пяты (основания) и продольной направляющей плиты. Элементы выполняются по схеме сборного железобетона секциями длиной 4÷5 метров на заводе ЖБИ. При этом предъявляются стандартные требования к сборке, транспортировке и установке элементов конструкции крепления. Важным этапом возведения направляющих элементов является их установка путем притопления строго по оси отверстия сооружения.

Даже небольшое отклонение от принятой системы координат может дать негативный результат в системе управления, сопровождающийся резким ростом размывающей способности потока и разносом концевой части крепления дна.

Подготовка основания (высотная планировка) под направляющие элементы должна осуществляться перед установкой блоков водопропускных сооружений с использованием землеройной спецтехники (земснарядов, плавающих многоковшовых экскаваторов, землесосов и т.д.). Насыпная часть крепления дна осуществляется методом послойной отсыпки песчано-гравийной смеси и камня расчетного гранулометрического состава в принятых в проекте объемах.

Технология возведения продольных (сборных) направляющих элементов в составе крепления дна наплавным способом предполагает несколько этапов ведения работ.

I. Предварительный. Включает обустройство причальной стенки с подъездными путями, прокладку коммуникаций, устройство плавучего дока. Разработанная технология предполагает использование в качестве основы дока стальных барж водоизмещением не менее 500 т. Плавучесть конструкции обеспечивается за счет наличия пустот между двойными стенками. Док Андреев А.В., Иванова Т.В. Крепление дна в составе низконапорного водопропускного сооружения, возводимого наплавным способом

швартуется у причальной стенки, имеющей транспортную связь с берегом. Системы управления процессами сборки направляющих элементов и их установки должны быть электрофицированы. Процесс транспортировки выполняется с помощью катеров и буксиров.

II. Изготовление по расчетным размерам составных частей направляющих элементов (пяты и стенок) на заводе ЖБИ (см. рис. 4), изготовление крепежа. Транспортировка бетонных элементов к месту сборки. Возможно использование водного и автомобильного транспорта.

III. Укрупненный монтаж (сборка) направляющих элементов в границах плавучего дока. Монтаж включает омоноличивание швов, гидроизоляцию металлических частей.

IV. Монтаж понтонов и другого оборудования, в т.ч. подъемного, в доке вдоль направляющего элемента (см.рис.4а).

V. Шлюзование, подтопление дока, всплытие понтонов и направляющего элемента.

VI. Транспортировка бетонных элементов с помощью понтонов и плавучих транспортных средств к месту установки (см. рис. 4б).

VII. Установка продольных элементов в составе крепления дна, которая включает:

- ориентацию изделия на месте установки с использованием торцевых фиксаторов и стальных тросов,
- опускание направляющего элемента,
- демонтаж фиксаторов и стальных тросов.
- VIII. Транспортировка понтонов к доку (месту сборки) включает:
- транспортировку понтонов к шлюзовой камере,
- снятие монтажных платформ,
- разборку понтонов,
- откачку воды из дока (шлюза).

Следует отметить, что представленные на рис. 4 размеры сборного железобетонного направляющего элемента были выбраны из расчета безаварийной эксплуатации водопропускного сооружения типа В2. в условиях опасности аварийного незакрытия затвора.

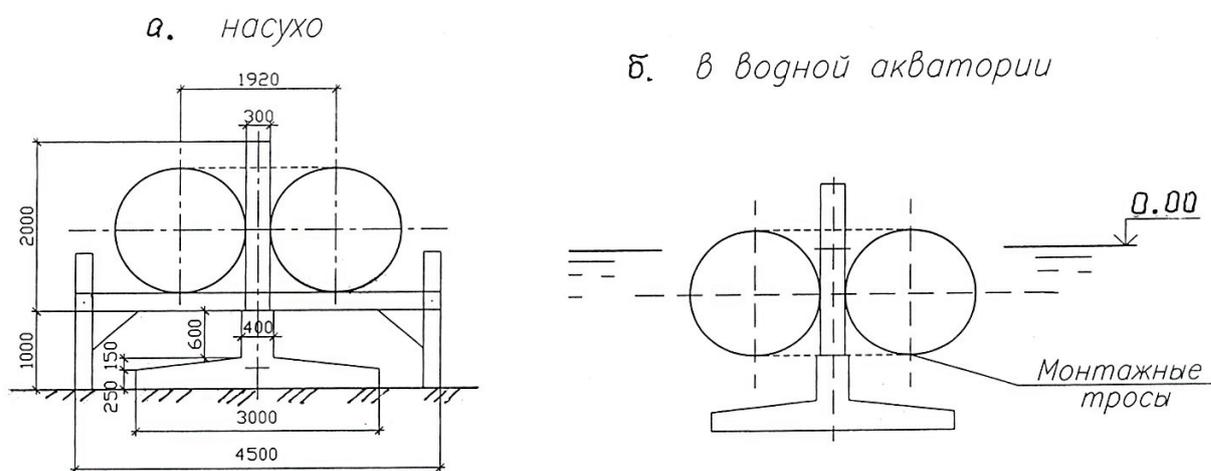


Рисунок 4. Конструкция крепления дна (направляющие элементы) после сборки в доке (а) и в период транспортировки (б)

Предлагаемая технология возведения крепления дна наплавным способом может быть рекомендована для ГТС, возводимых в составе сооружений на относительно малых глубинах дна, не превышающих 5÷6 метров. В отличие от известных ранее технологий, когда монтаж элементов напорного фронта, в т.ч. защитных сооружений, осуществляется с помощью кранов морского базирования большой грузоподъемности, при глубинах водной акватории 10-12 метров, мы имеем более рациональную технологию ведения строительных работ. Разработанная технология возведения элементов крепления дна наплавным способом может осуществляться в широком диапазоне глубин дна и размеров

Выводы

1. Разработанная конструкция крепления дна в виде продольных, ориентируемых вдоль потока направляющих элементов (стенок) позволяет эффективно управлять потоками в нижнем бьефе, формирующимися по типу волнистого гидравлического прыжка.

2. Полученные результаты позволяют сделать обобщающий вывод о том, что предложенная конструкция крепления дна с направляющими элементами имеет регулирующий эффект в интервале величин $0,4 \leq Fr_{1,2} \leq 0,8$ в нижнем бьефе.

3. Предлагаемая технология с использованием Т-образной конструкции сборного профиля направляющих элементов позволяет осуществлять их транспортировку к месту установки и монтаж с помощью понтонов наплавным способом, что позволяет вести процесс строительства без общепринятых ограждающих перемычек с минимальным негативным воздействием на окружающую природную среду.

4. Указанная в данной статье методика сборки, транспортировки и установки продольных регулирующих элементов не предполагает использования большегрузных подъемных устройств (кранов), в том числе в наплавном исполнении, а может быть ограничена стандартными лебедками, монтируемыми как на месте сборки, так и на специальных площадках непосредственно на понтонах.

Литература

1. Чугаев Р.Р. Гидравлические термины. М.: Высшая школа, 1974. 104 с.
2. Фидман Б.А. Турбулентность водных потоков. Л.: Гидрометеоздат, 1991. 230 с.
3. Ляхтер В.М., Прудовский А.М. Гидравлическое моделирование. М.: Энергоатомиздат, 1984. 390 с.
4. Леви И.И. Моделирование гидравлических явлений. М.-Л.: Госэнергоиздат, 1960. 210 с.
5. Боровков В.С., Бойков В.Н., Писарев Д.В., Воинов Н.А. Локальное подобие течения и распределение скоростей в турбулентных потоках // Инженерно-строительный журнал. 2012. №6. С. 11-19.
6. Chan K.C., Street R.L. A computer study of finite amplitude water waves // J. Comput. Phys. 1970. Vol. 6. Pp. 68.
7. Андреев А.Е., Кузьмин С.А. Выбор конструкции крепления дна за водопропускными сооружениями защитного комплекса // Научно-технические ведомости СПбГПУ. 1997. №1-2. С. 88-92.
8. Андреев А.Е., Иванова Т.В. Крепление дна с управляемым процессом диссипации энергии потока // Мелиорация и водное хозяйство. 2001. №3. С. 37-39.
9. Giola G., Bombardelli F.A. Scaling and similarity in rough channel flows // Phys. Rev. Lett. 2002. 88, 014501. Pp. 1-4.
10. Справочник по расчету водосбросных гидротехнических сооружений / Под ред. Векслера А.Б. М.: Энергоатомиздат, 1988. 624 с.
11. Попова К.С. Воздействие волн на плиты крепления водопропускных сооружений // Известия ВНИИГ им. Б.Е.Веденеева. 1982. Т. 145. С.120-125.
12. Гиргидов А.Д. Механика жидкости и газа (гидравлика). СПб.: Изд-во Политехн.ун-та, 2007. 545 с.
13. Flack K.A., Schultz M.P., Shapiro T.A. Experimental support for Townsend's Reynolds number similarity hypothesis on rough walls // Phys. Fluids. 2005. 17, 035 102. Pp. 1-9.
14. Бухбиндер А.И. Теория потоков. Конспект лекций. Л.: ЛПИ, 1973. 218 с.
15. Лойцянский Л.Г. Механика жидкости и газа. М.: Наука, 1977. 440с.
16. Телешев В.И., Ватин Н.И., Марчук А.Н., Комаринский М.В. Производство гидротехнических работ (часть 1). М.: Энергоиздат, 2010. 186 с.
17. Чураков А.И., Волнин Б.А., Степанов П.Д., Шайтанов В.Я. Производство гидротехнических работ. М.: Стройиздат, 1985. 570 с.
18. Serafim J.L., Coutinho-Rodrigues J.M. Statistics of dam failures: a preliminary report // Int. Water Power & Dam Construction. 1989. Vol. 41. №4. Pp. 30-34.

**Татьяна Викторовна Иванова, Санкт-Петербург, Россия*

Тел. раб.: 7(812)493-9363; эл. почта: ivanovavt@vniig.ru

© Андреев А.В., Иванова Т.В., 2012

Андреев А.В., Иванова Т.В. Крепление дна в составе низконапорного водопропускного сооружения, возводимого наплавным способом

doi: 10.5862/MCE.35.12

Bottom paving as a part of the low pressure culvert erected by the float-on method

A.E. Andreyev, T.V. Ivanova,

JSC Vedeneyev VNIIG, Saint-Petersburg, Russia

7(812)493-9363; e-mail: ivanovatv@vniig.ru

Key words

bottom paving; near-critical flows control; technology improvement; guide elements

Abstract

The widely used low pressure culverts are operated in the drop range between 1.5 and 5.0 meters. They distinguish by the near critical pairing mode of bays: in the downstream the true hydraulic jump does not develop. In this case the undular hydraulic jump develops in the downstream. Article is devoted to the issues of the improvement of bottom paving structures in low pressure constructions and the technology of its erecting.

Features of controlling the near-critical flows arising during the operation are analyzed. Possible ways of technology improvement of structures are given illustrated by the example of bottom paving structures with guide elements. Results of hydraulic researches validating this construction are given.

References

1. Chugaev R.R. *Gidravlicheskiye terminy* [Hydraulic terms]. Moscow: Visshaya shkola, 1974. 104 p. (rus)
2. Fidman B.A. *Turbulentnost vodnykh potokov* [Water flow turbulence]. Leningrad: Hydrometeoizdat, 1991. 230 p. (rus)
3. Lyachter V.M., Prudovsky A.M. *Gidravlicheskiye modelirovaniye* [Hydraulic modeling]. Moscow: Energoatomizdat, 1984. 390 p. (rus)
4. Levi I.I. *Modelirovaniye gidravlicheskiykh yavleniy* [Simulation of hydraulic phenomena]. Moscow–Leningrad: Gosenergoizdat, 1960. 210 p. (rus)
5. Borovkov V.S., Boikov V.N., Pisarev D.V., Volinov N.A. *Magazine of Civil Engineering*. 2012. No. 6. Pp. 11-19. (rus)
6. Chan K.C., Street R.L. Computer study of finite-amplitude water waves. *J. Comput. Phys.* 1970. Vol. 6. Pp. 68.
7. Andreev A.E., Kuzmin S.A. *Nauchno-tekhnicheskiye vedomosti SPbGPU*. 1997. No. 1-2. Pp. 88-92. (rus)
8. Andreev A.E., Ivanova T.V. *Melioratsiya i vodnoye khozyaystvo*. 2001. No. 3. Pp. 37-39. (rus)
9. Giola G., Bombardelli F.A. Scaling and similarity in rough channel flows. *Phys. Rev. Lett.* 2002. 88, 014501. Pp. 1-4.
10. *Spravochnik po raschetu vodosbrosnykh gidrotekhnicheskikh sooruzheniy. Pod red. Vekslera A.B* [Calculating spillway hydraulic structures. Reference. Edited by Veksler A.B.] Moscow: Energoatomizdat, 1988. 624 p. (rus)
11. Popova K.S. *Izvestiya VNIIG im. B.E. Vedeneyeva*. 1982. Vol. 145. Pp. 120-125. (rus)
12. Gyrgidov A.D. *Mekhanika zhidkosti i gaza (gidravlika)* [Fluid mechanics (hydraulics)]. St. Petersburg: Izd-vo Politekhn.un-ta, 2007. 545 p. (rus)
13. Flack K.A., Schultz M.P., Shapiro T.A. Experimental support for Townsend's Reynolds number similarity hypothesis on rough walls. *Phys. Fluids*. 2005. 17, 035 102. Pp. 1-9.
14. Buhbinder A.I. *Teoriya potokov. Konspekt lektsiy* [Theory of flows. Lecture notes]. Leningrad: LPI, 1973. 218 p. (rus)
15. Loicanskii L.G. *Mekhanika zhidkosti i gaza* [Fluid mechanics]. Moscow: Nauka, 1977. 440 p. (rus)
16. Teleshev V.I., Vatin N.I., Marchuk A.N., Komarinskii M.V. *Proizvodstvo gidrotekhnicheskikh rabot (chast 1)* [Hydrotechnic structures construction. (Part 1)]. Moscow: Energoizdat, 2010. 186 p. (rus)
17. Churakov A.I., Volnin B.A., Stepanov P.D., Shaitanov V.Y. *Proizvodstvo gidrotekhnicheskikh rabot* [Hydrotechnic structures construction]. Moscow: Stroiizdat, 1985. 570 p. (rus)
18. Serafim J.L., Coutinho-Rodrigues J.M. Statistics of dam failures; a preliminary report. *Int. Water Power & Dam Construction*. 1989. Vol. 41. No. 4. Pp. 30-34.

Full text of this article in Russian: pp. 97-102

Andreyev A.E., Ivanova T.V. Bottom paving as a part of the low pressure culvert erected by the float-on method