

## 05.23.07 Гидротехническое строительство

Оригинальная статья

УДК 502/504:627.83:532.54

DOI: 10.26897/1997-6011-2022-2-56-62

## ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ГАШЕНИЯ ЭНЕРГИИ ПОТОКА В НИЖНЕМ БЬЕФЕ

**КАНЬЯРУГЕНДО ЛЕОНИДАС**<sup>✉</sup>, аспирант

kany.l@mail.ru

**ГУРЬЕВ АЛИМ ПЕТРОВИЧ**<sup>✉</sup>, д-р техн. наук, профессор

alim\_guryev@mail.ru

**ХАНОВ НАРТМИР ВЛАДИМИРОВИЧ**, д-р техн. наук, профессор

khanov@rgau-msha.ru

Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева; 127434, г. Москва, Тимирязевская ул., 49, Россия

Оценивается эффективность применения искусственной шероховатости в качестве гасителя энергии потока на сливной грани бетонного водослива. Изложен сравнительный анализ влияния различных видов элементов сопротивления на повышение эффективности гашения энергии потока в нижнем бьефе. Отдельно рассмотрены элементы сопротивления в виде донных рёбер, горизонтально лежащих на дне водоската, а также вертикально стоящие элементы сопротивления (кубы, цилиндры, бетонные блоки, полушария). Оценивается влияние формы элементов, их расположения и их плотности распределения на единицу площади. Среди изученных ребристых элементов шероховатости, наиболее перспективным является двойной зигзаг против течения. Среди вертикально стоящих элементов, целесообразно отдавать предпочтение элементам с острыми краями (кубы, блоки, пластины). Большинство работ, посвящённых изучению искусственной шероховатости, основываются на экспериментах, проводимых в естественных или искусственных руслах с относительно небольшими уклонами по сравнению с водосливной гранью водосбросов практического профиля, а также крутопадающие участки быстротоков с уклонами  $i > 0,3$ . Предлагается оценка эффективности работы донных ребристых элементов на модели низко- и средненапорной бетонной плотины для выявления наиболее действенных конструкций применительно к часто применяемым на практике элементам сопротивления на быстротоках.

**Ключевые слова:** водослив, быстроток, искусственная шероховатость, уклон, гашение энергии

**Формат цитирования:** Каньяругендо Л., Гурьев А.П., Ханов Н.В. Повышение эффективности гашения энергии потока в нижнем бьефе // Природообустройство. – 2022. – № 2. – С. 56-62. DOI: 10.26897/1997-6011-2022-2-56-62.

© Каньяругендо Л., Гурьев А.П., Ханов Н.В., 2022

Original article

## INCREASED EFFICIENCY OF FLOW ENERGY DISSIPATION IN THE DOWNSTREAM

**KANYARUGENDO LEONIDAS**<sup>✉</sup>, PhD student

kany.l@mail.ru

**GURYEV ALIM PETROVICH**<sup>✉</sup>, Doctor of Technical Sciences, Professor

alim\_guryev@mail.ru

**KHANOV NARTMIR VLADIMIROVICH**, Doctor of Technical Sciences, Professor

khanov@rgau-msha.ru

Russian state agrarian university – MAA named after C.A. Timiryazev; 127434, Moscow, Timiryazevskaya ul., 49, Russia

*The present study assesses the efficiency of using artificial roughness as a flow energy dissipater on the spillway of a low-head concrete spillway. A comparative analysis of the effect of different types of roughness elements in the downstream is presented. Separately, the elements of resistance in the form of bottom ribs lying horizontally at the bottom of the waterfall, as well as vertically standing elements of resistance (cubes, cylinders, concrete blocks, hemispheres) are considered. The influence of the shape of the elements, their location and their distribution density per unit area is evaluated. Among the ribbed elements of roughness studied, the most promising is the double zigzag against the current. Among the vertically standing elements, it is advisable to give preference to elements with sharp edges (cubes, blocks, plates). Most of the works devoted to the study of artificial roughness is based on experiments conducted in natural or artificial channels with relatively small slopes compared to the spillway face of practical profile spillways, as well as steeply falling sections of fast currents with slopes of  $i > 0.3$ . An assessment of the efficiency of the bottom ribbed elements on the model of a low- and medium-pressure concrete dam is proposed to identify the most effective structures in relation to the resistance elements often used in practice at fast currents.*

**Keywords:** spillway, fast current, artificial roughness, slope, energy dissipation

**Format of citation:** Kanyarugendo L., Guriev A.P., Khanov N.V. Increased efficiency of flow energy dissipation in the downstream // Prirodoobustrojstvo. – 2022. – № 2. – S. 56-62. DOI: 10.26897/1997-6011-2022-2-56-62.

**Введение.** Для удовлетворения хозяйственно-бытовых нужд, человечеству часто требуется регулирование используемых имеющихся водных ресурсов путём возведения гидросооружений различного назначения. В этом случае гашение энергии потока на гидросооружениях – одна из неизбежных задач в гидротехнике [1, 2].

Одним из наиболее распространённых способов гашения энергии потока воды на низко- и средненапорных гидроузлах является применение водобойных колодцев и стенок в нижнем бьефе. При этом на сливной грани тратится незначительная часть энергии сбрасываемого потока на преодоление гидравлических потерь, а основное гашение энергии сбрасываемого потока происходят в водобойном колодце в виде местных потерь энергии. Баланс потерь энергии при этом имеет вид:

$$\Sigma h_w = h_{дл} + h_m, \quad (1)$$

где:  $\Sigma h_w$  – сумма гидравлических потерь энергии;  $h_{дл}$  – потери по длине сливной поверхности водослива;  $h_m$  – местные потери энергии в водобойном колодце.

Гидравлически потери длине сливной поверхности водослива определяются по зависимости [1]:

$$h_{дл} = \frac{\lambda \cdot L}{4 \cdot R} \cdot \frac{v^2}{2g}, \quad (2)$$

где:  $\lambda$  – коэффициент Дарси гидравлических потерь по длине;  $R$  – гидравлический радиус потока;  $L$  – длина рассматриваемого участка потока;  $v$  – средняя скорость движения воды в потоке;  $g = 9,81 \text{ м/с}^2$  – ускорение свободного падения.

Гидравлические потери энергии в гидравлическом прыжке определяются по выражению [1]:

$$h_m = \frac{(h'' - h')^2}{4 \cdot h' \cdot h''}, \quad (3)$$

где:  $h'$  – глубина потока в начале прыжка в сжатом сечении;  $h''$  – вторая сопряжённая глубина в конце гидравлического прыжка.

В свою очередь, вторая сопряжённая глубина  $h''$  гидравлического прыжка определяется по зависимости [1]:

$$h'' = \frac{h'}{2} \cdot (\sqrt{8 \cdot Fr_1 + 1} - 1), \quad (4)$$

где  $Fr_1 = \frac{v^2}{gh'}$  – число Фруда в сжатом сечении.

После возведения плотины резко изменяется гидрологический режим в нижнем бьефе гидроузла: в водохранилище задерживаются все крупные и мелкие наносы, в результате чего в нижний бьеф поступает осветлённый поток с большой размывающей способностью. Вследствие этого сначала начинаются интенсивные местные деформации русла вблизи энергогасящего сооружения, а затем во времени происходят общие деформации русла на большом расстоянии от энергогасящего сооружения [2].

В ряде случаев при возведении водосливных плотин происходит отклонение режимов эксплуатации водосбросного сооружения от расчётных проектных решений. Такая ситуация произошла на Жигулёвской ГЭС. По проекту

пропуск паводковых вод предполагался сначала через совмещённые водосбросы здания ГЭС, а после исчерпания их пропускной способности должны были включаться пролёты водосбросной плотины. Однако, в первые годы эксплуатации гидроузла был нарушен порядок маневрирования затворами водосбросных отверстий здания ГЭС, что привело к значительным деформациям нижнего бьефа за зданием ГЭС и отказу в дальнейшем от использования его водосбросных отверстий. В результате этого пропуск излишков воды начал осуществляться через водосбросную плотину, что привело к возникновению отогнанного гидравлического прыжка на рисберме и повышенных нерасчётных вибрационных нагрузок на гасителях энергии в нижнем бьефе. Эти вибрации создавали на окружающей гидроузла территорию как источники локальных землетрясений, которые при высоких расходах с сбрасываемого холостого расхода по настоящее время создают условия, недопустимые с точки зрения безопасности сооружений гидроузла и объектов промышленно-гражданского назначения, расположенных вблизи гидроузла.

Единственным средством исправления этой ситуации является затопление гидравлического прыжка на рисберме водосбросной плотины.

Как видно из зависимости (1), исправлению неблагоприятной картины гашения энергии может быть увеличение потерь энергии сбрасываемого потока на сливной поверхности водослива, что обеспечит уменьшение энергии сбрасываемого потока в сжатом сечении за счёт увеличения его глубины и уменьшение потребной второй сопряжённой глубины. В соответствии с [1] искусственная шероховатость в десятки раз увеличивает потери по длине по сравнению с естественной шероховатостью бетонной поверхности. Это повышение глубины в сжатом сечении потока на водоскате водосливной плотины с минимальными затратами и максимальной эффективностью можно достичь устройством искусственной шероховатости на водоскате. Такой приём позволит компенсировать отклонения эксплуатации водосбросных сооружений гидроузла от проектных решений.

#### Материалы и методы исследований.

Теория расчёта водопроводящих сооружений с искусственной шероховатостью рассмотрена во многих учебниках по гидравлике и гидротехническим сооружениям [1, 3-8]. Большой вклад в изучении усиленной шероховатости на водопропускных сооружениях внесли Ф.И. Пикалов, который исследовал водотоки с искусственной шероховатостью для уклонов дна водотока  $i$  в диапазоне  $0,05 < i < 0,15$  и О.М. Айвазян,

который в своих исследованиях расширил диапазон уклонов  $0,05 < i < 0,57$  [1, 9, 10].

Профессор Афинского Национального Технического Университета (Греции) George C. Christodoulou исследовал несколько видов элементов сопротивления в канале с уклоном  $0,165$  [11]. Результаты его исследований представлены на рисунке 1. По его выводам и как видно на рисунке 1 следует отметить, что при одной и той же фронтальной плотности расстановки элементов сопротивления по течению, эффективнее всего оказались вертикальные пластины, блоки и кубы.

Элементы с закругленными рёбрами оказались менее эффективными по сравнению с элементами аналогичного размера с острыми кромками. Сопротивление полушарий и цилиндров, нормальных к потоку с той же высотой и площадью проекции, что и кубы, значительно ниже (рис. 1).

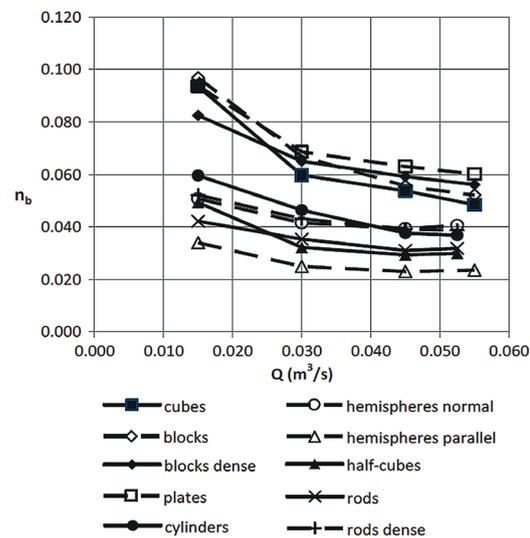


Рис. 1. Зависимость коэффициента шероховатости  $n$  от вида элементов шероховатости

Fig. 1. Dependence of the roughness coefficient  $n$  on the type of roughness elements

Сливные поверхности водосливов практического профиля, очерченных по координатам Кригера-Офицера, могут иметь уклоны, превосходящие величину  $i = 0,8 \dots 0,9$ . Для выявления возможности применения к ним элементов искусственной шероховатости с целью снижения части энергии потока, которая гасится в водобойном колодце, и выявления наиболее перспективных из них с точки зрения эффективности гашения, были выполнены предварительные расчеты применительно к физической модели, на которой запланированы соответствующие эксперименты в гидравлической лаборатории кафедры гидротехнических сооружений

РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева [12]. Перспективный вид модели водослива практического профиля с искусственной шероховатостью на сливной поверхности показан на рисунке 2.

Для изучения влияния искусственной шероховатости сливной поверхности водослива была использована модель водосброса № 2 Богучанской ГЭС, на одном из пролётов которой принято решение исследовать в лабораторных условиях влияние искусственной шероховатости на условия гашения энергии потока на одном из пролётов, показанных на рисунке 2.

Модель водосброса выполнена из оргстекла [13]. Основная часть длины водоската имела уклон  $i = 0,76$ , а высота модели от дна прямоугольного лотка нижнего бьефа до гребня составляет 70 см. Лоток имел постоянную ширину 20,4 см. Нужный подпор создается подъемом подвижной регулирующей стенки, установленной на концевой части водослива. Коэффициент расхода порога исследуемого пролёта модели составляет  $m = 0,44$ .

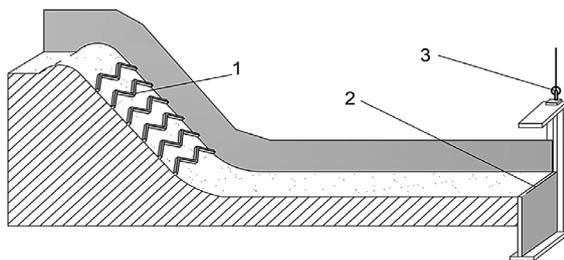


Рис. 2. Перспективный вид модели водослива практического профиля с искусственной шероховатостью на сливной поверхности:

- 1 – элементы сопротивления,  
2 – регулируемая подпорная стена,  
3 – подъемный механизм

Fig. 2. Perspective view of the spillway model of a practical profile spillway with artificial roughness on the drain surface:

- 1 – resistance elements,  
2 – adjustable retaining wall, 3 – lifting mechanism

Для этой модели были выполнены предварительные теоретические расчёты влияния пяти видов ребристой шероховатости на изменение параметров потока в сжатом сечении.

В современной практике, искусственная шероховатость широко изучена на быстротоках, а также при креплении нижнего бьефа гидросооружений, уклон которых не превышает  $i = 0,3$  [13-15]. Несмотря на то, что уклон водосливных граней плотин, как правило, значительно больше, чем уклон, который встречается на быстротоках, в аналитических расчетах будем придерживаться уже установленных методов,

закономерностей и утверждений, полученных при исследовании работы донных ребристых элементов сопротивления на быстротоках.

В расчетах был принят метод гидравлического расчета, предложенного О.М. Айвазяном [1] для открытых русел с донной ребристой шероховатостью при условно равномерном движении, при котором для установившегося режима движения воды уклон свободной поверхности  $I$  равен уклону дна  $i$ :  $I = i$ .

Это условие выполняется при относительной глубине потока  $h$  больше трёх высот искусственной шероховатости  $\Delta$ :  $h \geq 3\Delta$ . В этом случае коэффициент Дарси можно выразить эмпирической зависимостью:

$$\lambda = M + 2i^2 - Ni \cdot lgi \cdot \left( \frac{\Delta}{h} \cdot \frac{b}{\chi} \cdot \frac{1}{\sqrt{\Pi_k}} \right), \quad (5)$$

где:  $M$  и  $N$  – числовые параметры, зависящие от типа усиленной шероховатости;  $i$  – уклон дна водоската;  $\Delta$  – высота ребер шероховатости;  $h$  – глубина потока над ребром;  $b$  – ширина водоската по дну;  $\chi$  – смоченный периметр;  $\frac{b}{\chi}$  – учитывает роль ребристой шероховатости во всем смоченном периметре;  $\Pi_k$  – параметр кинетичности.

Из (2) можем получить выражение для определения  $\lambda$ :

$$\lambda = \frac{8gR}{v^2} \cdot \frac{h_{ав}}{L} = \frac{8gR}{v^2} \cdot i, \quad (5)$$

Используя уравнение неразрывности потока на водоскате с ребристой шероховатостью, уравнение (2) можно привести к следующему виду:

$$\lambda = \frac{8gRi}{v^2} = \frac{8gi}{Q^2} \cdot \frac{\omega^3}{\chi}. \quad (7)$$

Подставляя значение коэффициента  $\lambda$  из уравнения (7) в уравнение (3), получим:

$$\Delta = \frac{8g}{Q^2} \cdot \frac{M + 2i^2}{i} \cdot h \cdot \frac{\chi}{b} \sqrt{\Pi_k}$$

или

$$\frac{\omega^3}{\chi} + \frac{Q^2}{8g} b N \Delta \cdot lgi \cdot \frac{1}{h \chi \sqrt{\Pi_k}} = \frac{Q^2}{8g} \cdot \frac{M + 2i^2}{i}. \quad (8)$$

Заменяя  $\sqrt{\Pi_k}$  на его значение  $\frac{q}{\sqrt{g \cdot h \cdot \sqrt{h}}}$ , уравнение (8) примет вид:

$$\frac{h^3}{\chi} + \frac{1}{8\sqrt{g}} q N \Delta \cdot lgi \cdot \frac{\sqrt{h}}{\chi} = \frac{1}{8g} \cdot \frac{q^2}{b} \cdot \frac{M + 2i^2}{i}. \quad (9)$$

Приведенные выше формулы дают достоверные результаты при условиях  $\delta \approx 7 \dots 8\Delta$ , где  $\delta$  – расстояние между двумя рядами ребер шероховатости высотой  $\Delta$  [16, 17].

**Результаты и обсуждение.** Эффективность гашения энергии искусственной шероховатостью была проверена методом О.М. Айвазяна (уравнением 9) при разных напорах на вышеуказанной модели от  $H = 2,5$  см до  $H = 15$  см и  $\Delta = 1,2$  см.

Рассмотрено пять типов сопротивления:

- 1 – Нормальные ребра;
- 2 – Зигзагообразные ребра с одним изломом против течения;
- 3 – Нормальные ребра в разбежку;

4 – Зигзагообразные ребра с двумя изломами по течению;

5 – Зигзагообразные ребра с двумя изломами против течения.

Полученные результаты приведены в таблице.

По данным таблицы построены графики зависимости глубины над выступами шероховатости и высоты самих выступов от удельного расхода, приведенных на рисунке 3.

Таблица

### Оценка влияния ребристых элементов сопротивления на сжатой глубине потока

Table

#### Evaluation of the effect of ribbed resistance elements at compressed flow depth

$H_0 = H, \text{ м}$	Удельный расход $q, \text{ м}^2/\text{с}$ <i>Unit discharge <math>q, \text{ м}^2/\text{с}</math></i>	$h$ без элементов сопротивления, м <i><math>h</math> without resistance elements, m</i>	Глубина воды над элементами сопротивления, в метрах, при $\Delta = 0,012$ м <i>Water depth over resistance elements, in meters, At <math>\Delta = 0,012</math> m</i>				
			$h_{ш1}$	$h_{ш2}$	$h_{ш3}$	$h_{ш4}$	$h_{ш5}$
0,025	0,0077	0,00227	0,016	0,016	0,017	0,017	0,018
0,05	0,02179	0,00634	0,028	0,029	0,0295	0,030	0,031
0,075	0,04003	0,0115	0,040	0,040	0,042	0,042	0,044
0,1	0,06163	0,0175	0,055	0,055	0,056	0,056	0,057
0,125	0,08613	0,0241	0,067	0,068	0,069	0,07	0,071
0,15	0,11322	0,0314	0,082	0,083	0,084	0,085	0,0855

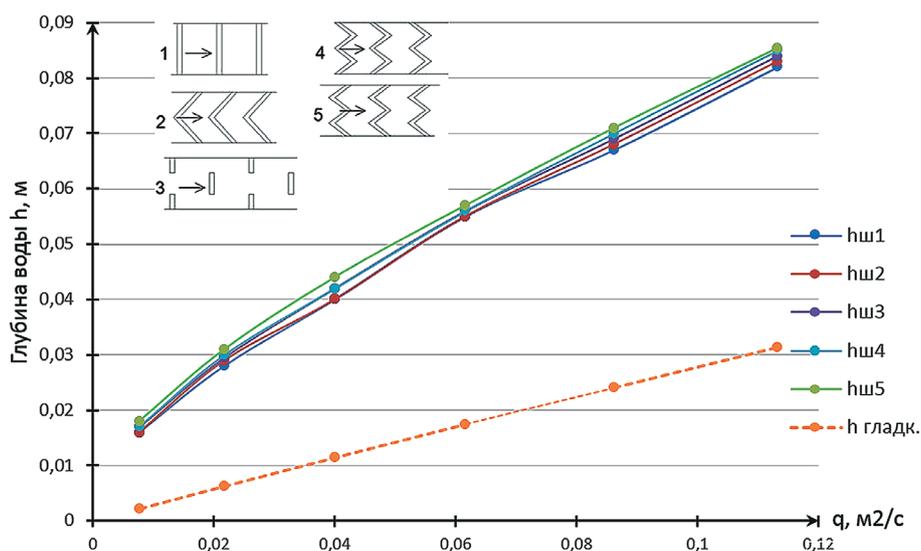


Рис. 3. Зависимость сжатой глубины  $h$  от элементов искусственной шероховатости

Fig. 3. Dependence of compressed depth  $h$  on elements of artificial roughness

Как видно из таблицы, применение искусственной шероховатости на водосливной поверхности водосброса значительно увеличивает глубину потока в сжатом сечении, снижая значение числа Фруда и по (4) и уменьшая вторую сопряжённую глубину, приводя одновременно с этим в соответствие с уменьшенной глубиной воды на водобое, образовавшейся в связи с изменением режима пропуска паводковых расходов через гидроузел.

#### Выводы

1. Положительный эффект применения ребристых элементов шероховатости при гашении энергии потока заключается в увеличении сжатой глубины потока. При одном и том же удельном расходе это означает снижение скорости потока в сжатом сечении и уменьшении второй сопряжённой глубины.

2. Можно управлять режимом сопряжения потоков в нижнем бьефе гидроузла за счет

применения элементов искусственной шероховатости на сливной поверхности водослива.

3. При небольших расходах, условие  $h \geq 3\Delta$  не выполняется, и движение потока воды будет в виде системы переливов через ребра шероховатости как через водосливные пороги.

4. Среди изученных ребристых элементов шероховатости, наиболее перспективным является двойной зигзаг против течения. Среди вертикально стоящих элементов, целесообразно

отдавать предпочтение последним с острыми краями (кубы, блоки, пластины).

5. В расчетах по определению коэффициента Дарси при использовании элементов шероховатости применялся метод О.М. Айвазяна, который рекомендуют при уклоне до 0.57, что меньше уклона сливной грани рассмотренной модели ( $i_{\text{модели}} = 0,76$ ). Полученные результаты следует экспериментально проверить в лабораторных условиях в более широком диапазоне уклонов сливной грани водосброса.

#### Библиографический список

1. **Агроскин И.И., Дмитриев Ф.И.** Гидравлика: учебник. Изд. 4. – М.–Л.: Изд-во Энергия. – 352 с.
2. **Розанов Н.П.** Гидротехнические сооружения: учебное пособие. – М.: Стройиздат, 1978. – 647 с.
3. **Справочник по гидротехнике.** – М.: Госиздат по строительству и архитектуре, 1955. – 828 с.
4. **Замарин Е.А.** Гидротехнические сооружения. – М.: Госиздат сельхозлитературы, 1960. – 624 с.
5. **Чертоусов М.Д.** Гидравлика. – М.–Л.: Госэнергоиздат, 1962. – 630 с.
6. **Гришин М.М.** Гидротехнические сооружения. – М.: Энергия, 1968. – 344 с.
7. **Рассказов Л.Н.** Гидротехнические сооружения. Ч. 2. – М.: Стройиздат, 1996. – 344 с.
8. **Рассказов Л.Н.** Гидротехнические сооружения (речные) Ч. 2. – М.: АСВ, 2011. – 536 с.
9. **Гурьев А.П.** Рекомендации по предупреждению кавитационной эрозии бетона на примере водосброса № 2 Богучанской ГЭС / Ханов Н.В., Фартуков В.А., Верхоглядова А.С., и др. // Природообустройство. – 2019. – № 4. – С. 69-77.
10. **Аубакирова Ф.Х.** Гашение избыточной энергии потока в водосбросных сооружениях при различных режимах сопряжения бьефов // Природообустройство. – 2015. – № 1. – С. 37-41.
11. **George C. Christodoulou.** Equivalent roughness of submerged obstacles in open channel flows // Journal of Hydraulic Engineering. National Technical University of Athens. – Zografou 15780 (GREECE), 2013. p. 21.
12. **Толошинов А.В.** Выбор конструкции концевого устройства поверхностного водосброса № 2 Богучанской ГЭС / Гурьев А.П., Козлов Д.В., Ханов Н.В., и др. // Гидротехническое строительство. – 2009. – № 3. – С. 10-15.
13. **Гурьев А.П.** Модельные гидравлические исследования водосброса № 2 Богучанской ГЭС с отбросом струи с длинными разделительными стенками / Румянцев И.С., Козлов Д.В., Ханов Н.В. и др. // Приволжский научный журнал. – 2009. – № 1. – С. 57-65.
14. **Санжиев А.Д.** Гидродинамическое взаимодействие потока с элементами искусственной шероховатости: дис. канд. техн. наук. – М., 1984. – 199 с.
15. **Адигамов Р.Т.** Совершенствование конструкций, методов гидравлических исследований и расчетов быстроток с искусственной шероховатостью: дис... канд. техн. наук. – М., 1991. – 200 с.

#### References

1. **Agroskin I.I., Dmitriev F.I.** Gidravlika: uchebnik. Izd. 4. – M.–L.: Izd-vo Energiya. – 352 s.
2. **RozaNov N.P.** Gidrotehnicheskie sooruzheniya: uchebnoe posobie. – M.: Strojizdat, 1978. – 647 s.
3. **Spravochnik po gidrotehnike.** – M.: Gosizdat po stroitelstvu i arhitekture, 1955. – 828 s.
4. **Zamarin E.A.** Gidrotehnicheskie sooruzheniya. – M.: Gosizdat selhoz literatury, 1960. – 624 s.
5. **Chertousov M.D.** Gidravlika. – M.–L.: Gose-nergoizdat, 1962. – 630 s.
6. **Grishin M.M.** Gidrotehnicheskie sooruzheniya. – M.: Energiya, 1968. – 344 s.
7. **Rasskazov L.N.** Gidrotehnicheskie sooruzheniya. Chast 2. – M.: Strojizdat, 1996. – 344 s.
8. **Rasskazov L.N.** Gidrotehnicheskie sooruzheniya (river). Chast 2. – M.: ASV, 2011. – 536 s.
9. **Gurjev A.P.** Rekomendatsii po preduprezhdeniyu kavitatsionnoj erozii betona na primere vodosbrosa № 2 Boguchannskoj GES / Khanov N.V., Fartukov V.A., Verhoglyadova A.S. i dr. // Prirodoo- bustrojstvo. – 2019. – № 4. – S. 69-77.
10. **Aubakirova F.H.** Gashenie izbytochnoj energii potoka v vodosbrosnyh sooruzheniyah pri razlichnyh rezhimah copryazheniya bjefov // Prirodoo- bustrojstvo. – 2015. – № 1. – S. 37-41.
11. **George C. Christodoulou.** Equivalent roughness of submerged obstacles in open channel flows // Journal of Hydraulic Engineering. National Technical University of Athens. – Zografou 15780 (GREECE), 2013. p. 21.
12. **Toloshinov A.V.** Vybor konstruksii kontseвого ustrojstva poverhnostnogo vodosbrosa № 2 Boguchannskoj GES / Gurjev A.P., Kozlov D.V., Khanov N.V. i dr. // Gidrotehnicheskoe stroitelstvo. – 2009. – № 3. – S. 10-15.
13. **Gurjev A.P.** Modelnye gidravlicheskie issledovaniya vodosbrosa № 2 Boguchannskoj GES s otbrosom strui s dlinnymi razdelitelnymi stenkami / Rumyantsev I.S., Kozlov D.V., Khanov N.V. i dr. // Privolzhskij nauchnyj zhurnal. – 2009. – № 1. – S. 57-65.
14. **Sanzhiev A.D.** Gidrotehnicheskoe vzaimodejstvie potoka s elementami iskusstvennoj sherohovatosti: dis. kand. tehn. nauk. – M., 1984. – 199 s.
15. **Andiganov R.T.** Sovershenstvovanie konstruktsij, metodov gidravlicheskih issledovanij i raschetov bystrotokov s iskusstvennoj sherohovatosti: dis... kand. tehn. nauk. – M., 1991. – 200 s.

16. Ханов Н.В., Журавлёва А.Г., Мвуйекуре Жан Клод. Рекомендации по проектированию и строительству креплений нижнего бьефа трубчатых водовыпусков с гасителями ударного действия // Природообустройство. – 2017. – № 4. – С. 27-34.

17. Богославчик П.М., Круглов Г.Г. Проектирование и расчеты гидротехнических сооружений: учеб. пособие. – Минск.: «Вышэйшая школа», 2018. – 366 с.

#### Критерии авторства

Каньяругендо Л., Гурьев А.П., Ханов Н.В. выполнили теоретические и экспериментальные исследования, на основании которых провели обобщение и написали рукопись, имеют на статью авторское право и несут ответственность за плагиат.

#### Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликтов интересов

Статья поступила в редакцию 15.11.2021

Одобрена после рецензирования 18.04.2022

Принята к публикации 25.04.2022 г.

16. Khanov N.V., Zhuravleva A.G., Mvujekure Jean Claude. Rekomendatsii po proektirovaniyu i stroitelstvu kreplenij nizhnego bjefa trubchatyh vodovypuskov s gasitelyami udarnogo dejstviya // Prirodobustrojstvo. – 2017. – № 4. – S. 27-34.

17. Bogoslavchik P.M., Kruglov G.G. Proektirovanie i raschety gidrotehnicheskikh sooruzhenij: ucheb. posobie. – Minsk.: «Vyshejschaya shkola», 2018. – 366 s.

#### Criteria of Authorship

Kanyarugendo L., Guriev A.P., Khanov N.V. performed theoretical and experimental research, on the basis of which they conducted a generalization and wrote the manuscript. Kanyarugendo L., Guriev A.P., Khanov N.V. have a copyright on the article and are responsible for plagiarism.

#### Conflict of interests

The authors declare that there are no conflicts of interests

The article was submitted to the editorial office 15.11.2021

Approved after reviewing 18.04.2022

Accepted for publication 25.04.2022