

<https://doi.org/10.21122/2227-1031-2024-23-5-404-408>

УДК 627.824

## Основные принципы проектирования резервного водосброса с размываемой вставкой

Канд. техн. наук, доц. П. М. Богославчик<sup>1)</sup>, В. А. Евдокимов<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>Белорусский национальный технический университет (Минск, Республика Беларусь)

© Белорусский национальный технический университет, 2024  
Belarusian National Technical University, 2024

**Реферат.** На основании накопленного к настоящему времени опыта применения резервных водосбросов с размываемыми грунтовыми вставками и проведенных ранее исследований даны рекомендации по проектированию и расчетам таких сооружений. Представлены четыре варианта конструктивных и компоновочных решений. Первый вариант – размываемая вставка располагается в теле грунтовой плотины. Ограничивающая размыв одежда – бетонная. Второй вариант – то же, но ограничивающая размыв одежда выполнена из мягкого полимерного материала, например из геотекстиля или полимерной пленки. По третьему варианту размываемая вставка располагается в одном или нескольких пролетах поверхностного водосброса и работает по типу затвора «Гидроплюс». Четвертый вариант применим при соответствующих топографических условиях. Здесь размываемая вставка располагается вне напорного фронта в обход плотины и представляет собой небольшую размываемую дамбу. Предложен порядок гидравлических расчетов, которые выполняются в два этапа. На первом этапе определяют размеры водосбросного отверстия резервного водосброса на пропуск расчетного расхода. Затем выполняют расчет размыва грунтовой вставки, располагаемой в этом отверстии, который происходит при переливе воды через ее гребень при аварийной ситуации. Этот расчет дает возможность определить время размыва, а также построить гидрограф расхода воды через размываемый водосброс, графики изменений уровня верхнего бьефа и отметки гребня вставки в процессе размыва. Дифференциальные уравнения, описывающие процесс размыва, удобно решать численным методом. Предложен алгоритм расчета.

**Ключевые слова:** конструктивные схемы, компоновочные схемы, аварийная ситуация, стадия размыва, затвор «Гидроплюс», ограничивающая размыв одежда, гидрограф расхода, уравнение деформации

**Для цитирования:** Богославчик, П. М. Основные принципы проектирования резервного водосброса с размываемой вставкой / П. М. Богославчик, В. А. Евдокимов // *Наука и техника*. 2024. Т. 23, № 5. С. 404–408. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2024-23-5-404-408>

## Basic Principles for Designing Backup Spillway with Eroded Insert

P. M. Bohaslauchy<sup>1)</sup>, V. A. Evdokimov<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>Belarusian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus)

**Abstract.** Based on the experience accumulated to date in the use of backup spillways with eroded soil inserts and previously conducted studies, recommendations for the design and calculations of such structures are given. Four options for design and layout solutions are presented. The first option is that the eroded insert is located in the body of the earth dam. The erosion-limiting clothing is concrete. The second option is the same, but the erosion-limiting clothing is made of soft polymer material, for example, from geotextile or polymer film. According to the third option, the eroded insert is located in one or several spans of the surface spillway and operates like a “Hydroplus” gate. The fourth option is applicable under appropriate topographic conditions. Here, the eroded insert is located outside the pressure front, bypassing the dam and is a small eroded dam. A procedure for hydraulic calculations is proposed, which are performed in two stages. At the first stage, the dimensions of the spillway opening of the reserve spillway are determined to allow the design flow to pass through. Then, a calculation is made of the erosion of the soil insert located in this hole, which occurs when water overflows over its crest in an emergency.

### Адрес для переписки

Богославчик Петр Михайлович  
Белорусский национальный технический университет  
пр. Независимости, 65,  
220013, г. Минск, Республика Беларусь  
Тел.: + 375 44 505-90-10  
pmih@tut.by

### Address for correspondence

Bohaslauchy P. M.  
Belarusian National Technical University  
65, Nezavisimosty Ave.,  
220013, Minsk, Republic of Belarus  
Тел.: + 375 44 505-90-10  
pmih@tut.by

This calculation makes it possible to determine the time of erosion, as well as to construct a hydrograph of water flow through the eroded spillway, graphs of changes in the level of the headwaters and the marks of the crest of the insert during the erosion process. It is convenient to solve differential equations that describe the erosion process using a numerical method. A calculation algorithm is proposed.

**Keywords:** structural diagrams, layout diagrams, emergency situation, erosion stage, “Hydroplus” shutter, erosion-limiting clothing, flow hydrograph, deformation equation

**For citation:** Bohaslauchyk P. M., Evdokimov V. A. (2024) Basic Principles for Designing Backup Spillway with Eroded Insert. *Science and Technique*. 23 (5), 404–408. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2024-23-5-404-408> (in Russian)

## Введение

Первые упоминания о резервных водосбросах с размываемыми грунтовыми вставками появились в литературе примерно в 70-е гг. прошлого столетия. Они применялись на крупных гидроузлах с большими паводковыми расходами и назывались чаще всего водосбросами с предохранительными вставками, что наиболее точно отражало их назначение [1, 2]. Применение их на малых гидроузлах впервые начало рассматриваться в 1980-е гг., в то же время появились и первые серьезные исследования таких сооружений [3, 4]. К настоящему времени подобного рода исследований появилось достаточно для того, чтобы сформулировать основные принципы их проектирования.

## Основная часть

При проектировании резервных водосбросов с размываемыми грунтовыми вставками возникают вопросы, которые можно условно разделить на три части: конструкции, компоновочные решения, расчеты. Напомним принцип работы резервного водосброса с размываемой грунтовой вставкой. Он представляет собой водопропускное отверстие в напорном фронте, перекрытое грунтовой вставкой, отсыпанной из песчаного грунта [3]. Отметка гребня вставки несколько ниже отметки гребня основных подпорных сооружений. При аварийной ситуации, когда уровень верхнего бьефа по каким-то причинам поднимается выше критических отметок, происходит перелив через вставку и ее размыв. В освободившееся отверстие сбрасывается излишний расход. Конструктивные и компоновочные схемы такого сооружения могут быть следующими:

1) размываемая вставка располагается в теле грунтовой плотины. Ограничивающая размыв одежда – бетонная (рис. 1);

2) размываемая вставка располагается в теле грунтовой плотины. Ограничивающая размыв одежда из мягкого полимерного материала, например из геотекстиля или полимерной пленки (рис. 2);

3) размываемая вставка располагается в одном или нескольких пролетах поверхностного водосброса (рис. 3). В этом случае вставка работает как затвор «Гидроплюс» [5];

4) размываемая вставка располагается вне напорного фронта в обход плотины (рис. 4).

Цель гидравлических расчетов – определение размеров водопропускного отверстия, времени размыва грунтовой вставки, предельного повышения уровня верхнего бьефа при установленных выше размерах водопропускного отверстия, а также построение гидрографа расхода через рассматриваемый водосброс.

Алгоритм расчета разработан на основе исследований, результаты которых опубликованы в [4, 6]. В соответствии с характером работы водосброса расчет следует условно разделить на несколько этапов.

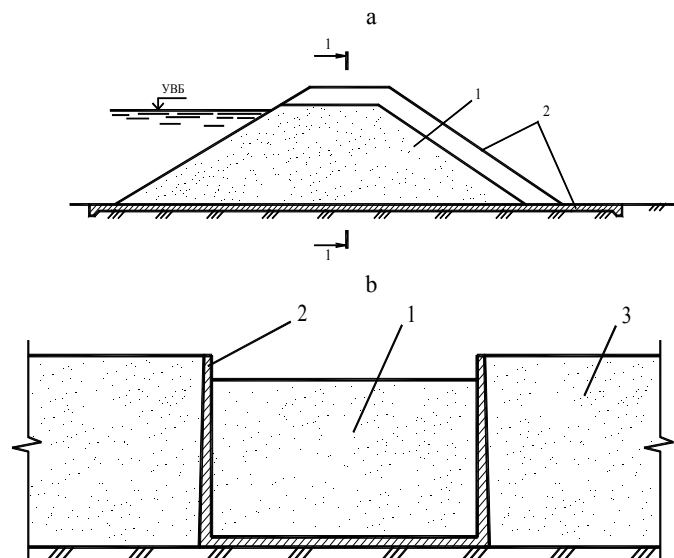


Рис. 1. Водосброс с размываемой грунтовой вставкой с ограничивающей размыв бетонной одеждой:

a – поперечный разрез; б – продольный разрез 1–1;

1 – размываемая вставка;

2 – ограничивающая размыв одежда

Fig. 1. Spillway with eroded soil insert and erosion-limiting concrete pavement: a – cross section;

b – longitudinal section 1–1;

1 – eroded insert; 2 – limiting-erosion clothing

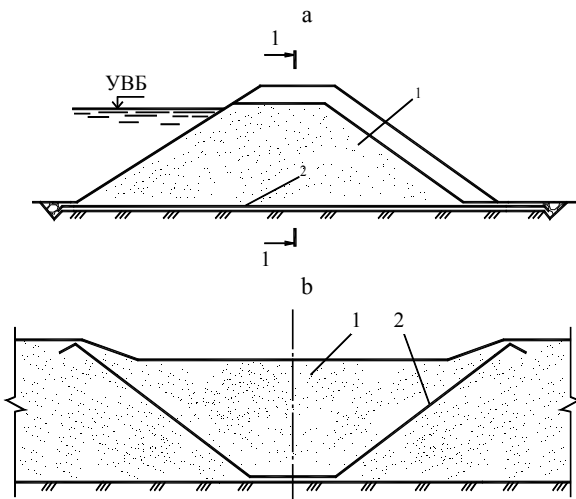


Рис. 2. Водосброс с размываемой грунтовой вставкой с ограничивающей размыв одеждой из мягкого полимерного материала: а – поперечный разрез; б – продольный разрез 1–1; 1 – размываемая вставка; 2 – геотекстиль или полимерная пленка; УВБ – уровень верхнего бьефа

Fig. 2. Spillway with eroded soil insert and erosion-limiting clothing made of soft polymer material: a – cross section; b – longitudinal section 1–1; 1 – eroded insert; 2 – geotextile or polymer film; УВБ – headwaters level

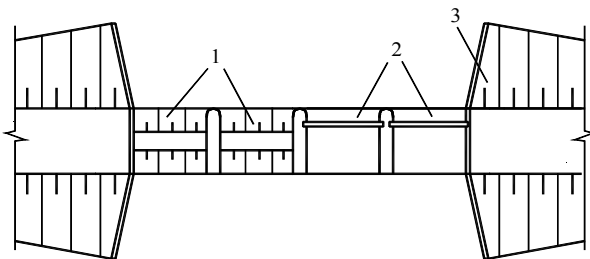


Рис. 3. Компоновка с размываемой вставкой в пролетах поверхностного водосброса: 1 – размываемая вставка; 2 – регулируемые пролеты поверхностного водосброса

Fig. 3. Layout with eroded insert in the spans of the surface spillway: 1 – eroded insert; 2 – adjustable spans of surface spillway

На 1-м этапе определяют размеры водопропускного отверстия. Ширина отверстия может быть определена из условия пропуска расчетного расхода  $Q_p$  из следующей формулы (по аналогии с расчетом пропускной способности прорана при пионерном перекрытии русла [7]):

$$Q_p = mb\sqrt{2g}H_0^{1,5}, \quad (1)$$

где  $m$  – коэффициент расхода;  $b$  – ширина водопропускного отверстия;  $H_0$  – напор с учетом скорости подхода.

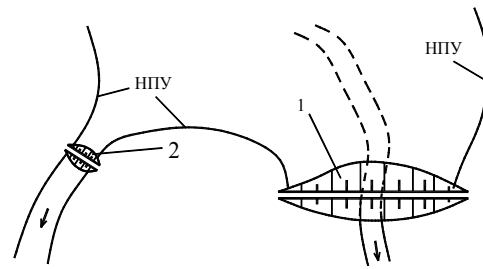


Рис. 4. Пример компоновки с размываемой вставкой в обход плотины: 1 – подпорное сооружение; 2 – размываемая дамба; НПУ – нормальный подпорный уровень

Fig. 4. Layout with eroded insert bypassing the dam: 1 – retaining structure; 2 – eroded dam; НПУ – normal retaining level

Расчетная схема представлена на рис. 5. Коэффициент расхода при  $z/H \leq 0,35$  рекомендуется определять по формуле

$$m = \left(1 - \frac{z}{H_0}\right) \sqrt{\frac{z}{H}}, \quad (2)$$

где  $z$  – перепад уровней верхнего и нижнего бьефов.

При  $z/H > 0,35$  следует принимать  $m = 0,385$  [7]. Ширину водопропускного отверстия  $b$  при трапецидальной форме можно принимать среднюю по высоте.

После определения размеров водопропускного отверстия следует выполнить расчет размыва вставки. Целью расчетов является: во-первых, определить предельное повышение уровня верхнего бьефа при установленных выше размерах водопропускного отверстия; во-вторых, построить гидрограф расхода через рассматриваемый водосброс.

Экспериментально установлено, что физическая картина размыва существенно зависит от скорости повышения уровня верхнего бьефа. При быстром повышении размыв происходит с одинаковой интенсивностью одновременно по всей ширине вставки. При медленном повышении уровня верхнего бьефа размыв может начаться в одной точке, после чего образуется небольшой проран, который постепенно увеличивается как в глубину, так и в ширину. Применительно к водосбросам более опасным для гидроузла является первый случай, то есть случай быстрого повышения уровня верхнего бьефа. Поэтому дальше рассматривается только этот случай.

Как было установлено ранее [4], размыв вставки начинается со стороны низового откоса и до полного размыва низовой призмы  $ABCD$  (рис. 6) отметка гребня размываемого водослива со стороны верховой бровки остается постоянной.

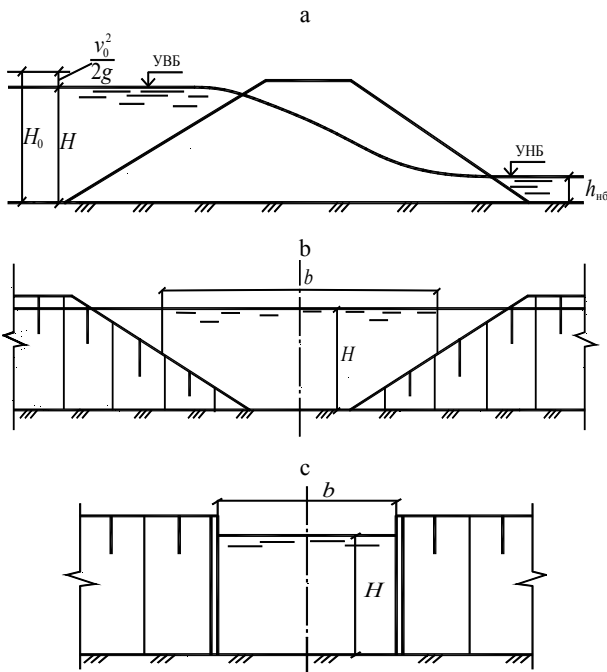


Рис. 5. Расчетная схема к определению размеров водопропускного отверстия: а – поперечный разрез; б – трапециoidalное отверстие; с – прямоугольное отверстие; УВБ – уровень верхнего бьефа; УНБ – уровень нижнего бьефа

Fig. 5. Design diagram for sizing culvert: a – cross section; b – trapezoidal hole; c – rectangular hole; УВБ – headwaters level; УНБ – tailwaters level

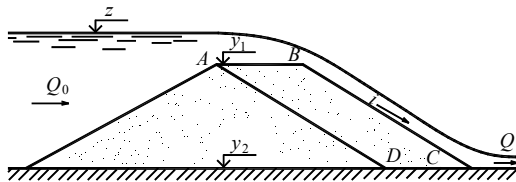


Рис. 6. Схема к расчету размыва вставки  
Fig. 6. Scheme for calculating insert erosion

Уравнение деформации для этой стадии размыва имеет вид [8]

$$\frac{dM}{dt} = 0,055 \frac{m^{1,45} i^{1,275} (2g)^{0,725}}{n^{2,55}} (z - y)^{2,175}, \quad (3)$$

где  $M$  – масса размываемого грунта, кг;  $t$  – время, с;  $m$  – коэффициент расхода размываемого водослива, на первой стадии определяется как для водослива с широким порогом;  $i$  – уклон дна по низовому откосу;  $n$  – коэффициент шероховатости, рекомендуется определять по формуле В. Н. Гончарова, а именно  $n = 0,0324d^{0,125}$  [9];  $z$  – уровень верхнего бьефа;  $y$  – отметка гребня размываемой плотины (для данной стадии размыва  $y = y_1 = \text{const}$ ).

Изменение уровня верхнего бьефа описывается следующей формулой:

$$\frac{dz}{dt} = \frac{Q_0 - Q}{F(z)}, \quad (4)$$

где  $Q_0$  – расход воды в верхнем бьефе, м<sup>3</sup>/с;  $F(z)$  – площадь зеркала воды в верхнем бьефе на отметке  $z$ , м<sup>2</sup>.

Расход воды через размываемую вставку  $Q$ , м<sup>3</sup>/с, определяется по формуле

$$Q = \sigma m b \sqrt{2g} (z - y)^{1,5}. \quad (5)$$

После размыва низовой призмы начинаются интенсивный размыв гребня и снижение отметки  $y$ . Уравнение деформации для этой стадии размыва имеет следующий вид [6]:

$$\frac{dy}{dt} = -\sigma \frac{B m^{0,43} \varepsilon_1}{\rho_1} (z - y)^{0,6}, \quad (6)$$

где  $B = 6,77(1 + \varphi) d g^{2,17} \left( \frac{5,64 n \sqrt{2g}}{\varphi w} \right)^{3,33}$ ;

$$\varepsilon_1 = \frac{1 - 1,26 m^{2/3}}{\beta} 2g;$$

$\sigma$  – коэффициент подтопления;  $\rho_0$  – плотность грунта тела плотины, кг/м<sup>3</sup>;  $d$  – средний диаметр частиц размываемого грунта, м;  $\varphi$  – параметр турбулентности (отношение расчетной скорости падения частицы в воде к ее действительной гидравлической крупности), в соответствии с рекомендациями [10] для мелкозернистых песков принимается равным 2,25;  $\beta$  – коэффициент, принимаемый для песчаных грунтов равным 1,5–2,0; коэффициент расхода  $m$  на этой стадии размыва определяется как для безвакуумного водослива практического профиля.

В отличие от методики, изложенной в [6, 8], ширина  $b$  является величиной заданной, так как размыв в случае быстрого повышения уровня верхнего бьефа происходит по всей ширине водосбросного отверстия.

Расчеты по формулам (3)–(6) удобно вести численным методом, а именно методом конечных разностей. Задаются интервалом времени  $\Delta t$ . Начальный момент времени  $t = 0$  – это момент, когда уровень верхнего бьефа при его повышении становится равным отметке гребня размываемой вставки, т. е.  $z = y$ . По окончании каждого интервала времени  $t + \Delta t$  определяют  $z$ ,  $Q$ ,  $\Delta M$ . При  $\Sigma \Delta M = M_0$ , где  $M_0$  – масса низовой призмы  $ABCD$ , переходят к расчету по

формуле (6). По расчетам строятся графики:  $z = f(t)$ ;  $y = f(t)$ ;  $Q = f(t)$ . Отметка  $z$  в какой-то момент не должна достигать величины, опасной для гидроузла. В противном случае следует увеличить ширину отверстия и расчеты повторить.

#### ВЫВОДЫ

1. Анализ опыта применения резервных водосбросов с размываемыми грунтовыми вставками позволил выделить четыре конструктивно-компоновочные схемы этих сооружений, которые дают основание для разработки проектных решений в зависимости от конкретных топографических и технологических условий.

2. Приведен порядок гидравлических расчетов, целью которых является определение размеров водопропускного отверстия, а также гидравлических параметров процесса размыва грунтовой вставки. Полученный в результате расчетов гидрограф расходов в створе размываемого водосброса  $Q = f(t)$  позволяет при необходимости прогнозировать процессы в нижнем бьефе, а график изменения уровня верхнего бьефа во времени  $z = f(t)$  позволяет определить максимальные уровни, которые не должны превышать предельно допустимые.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Проектирование и строительство больших плотин: материалы IX Международного конгресса по большим плотинам. Вып. 2: Постоянные и временные водосбросные сооружения / сост. М. Б. Гинзбург. М.: Энергия, 1972. 155 с.
2. Murti, N. G. K. Breaching Sections / N. G. K. Murti // *Irrigation and Power*. 1978. Vol. 35, No 3. P. 341–363.
3. Филиппович, И. В. Водосброс по типу размываемой вставки / И. В. Филиппович, П. М. Богославчик // *Водное хозяйство и гидротехническое строительство: респ. межведомств. сб.* Минск: Вышэйш. шк., 1982. Вып. 12. С. 96–100.
4. Богославчик, П. М. Гидравлический расчет резервного водосброса с размываемой грунтовой вставкой // *Водное хозяйство и гидротехническое строительство: респ. межведомств. сб.* Минск: Вышэйш. шк., 1990. Вып. 19. С. 24–30.
5. Лунаци, М. Э. Затворы системы «Гидроплюс» как фактор повышения безопасности и экономичности гидроузлов / М. Э. Лунаци, Г. Ф. Онирченко, В. Б. Родионов // *Безопасность энергетических сооружений*. М: ОАО «НИИЭС», 1998. Вып. 2; 3. С. 89–99.
6. Богославчик, П. М. Расчетная модель размыва грунтовых плотин при переливе / П. М. Богославчик // *Наука и техника*. 2018. Т. 17, № 4. С. 292–296.
7. Справочник по гидравлическим расчетам / под ред. П. Г. Киселева. М.: Энергия, 1974. 313 с.
8. Теоретические основы расчета размыва грунтовых плотин при переливе воды через гребень / В. В. Ивашечкин [и др.] // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2022. Т. 65, № 3. С. 276–284. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2022-65-3-276-284>.

9. Богославчик, П. М. К определению коэффициента шероховатости при расчете размыва грунтовых вставок / П. М. Богославчик // *Водное хозяйство и гидротехническое строительство: респ. межведомств. сб.* Минск: Вышэйш. шк., 1989. Вып. 18. С. 74–76.
10. Гончаров, В. Л. Динамика русловых потоков / В. Л. Гончаров. Л.: Гидрометеиздат, 1962. 373 с.

Поступила 18.12.2023

Подписана в печать 20.02.2024

Опубликована онлайн 30.09.2024

#### REFERENCES

1. Ginzburg M. B. [compiler] (1972) *Design and Construction of Large Dams. Proceedings of the 9th International Congress on Large Dams. Issue 2. Permanent and temporary spillway structures*. Moscow, Energiya Publ. 155 (in Russian).
2. Murti N. G. K. (1978) Breaching Sections. *Irrigation and Power*, 35 (3), 341–363.
3. Filippovich I. V., Bogoslavchik P. M. (1982) Spillway by Type of Blurred Insert. *Vodnoye Khozyaistvo i Gidrotekhnicheskoye Stroitelstvo: Resp. mezhvedomstv. sb. Vyp. 12* [Water Management and Hydraulic Engineering: Republican Interdepartmental Collection. Iss. 12]. Minsk, Vysheyshaya Shkola Publ., 96–100 (in Russian).
4. Bogoslavchik P. M. (1990) Hydraulic calculation of a reserve spillway with an eroded soil insert. *Vodnoye Khozyaistvo i Gidrotekhnicheskoye Stroitelstvo: Resp. mezhvedomstv. sb. Vyp. 19* [Water Management and Hydraulic Engineering: Republican Interdepartmental Collection. Iss. 19]. Minsk, Vysheyshaya Shkola Publ., 24–30 (in Russian).
5. Lunatsi M. E., Onirchenko G. F., Rodionov V. B. (1998) Gates of the “Hydroplus” System as a Factor in Increasing the Safety and efficiency of Waterworks. *Bezopasnost Energeticheskikh Sooruzheniy*. Vyp. 2; 3 [Safety of Energy Structures. Iss. 2; 3. Moscow, JSC Research Institute of Energy Constructions, 89–99 (in Russian).
6. Bogoslavchik P. M. (2018) Calculation Model of Soil Dam Wash-Away Due to Overflow. *Nauka i Tekhnika = Science & Technique*, 17 (4), 292–296 (in Russian). <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2018-17-4-292-296>.
7. Kiselev P. G. (ed.), Al'tshul' A. D., Danil'chenko N. V., Kasparson A. A., Krivchenko G. I., Pashkov N. N., Slisskii S. M. (1974) *Handbook of Hydraulic Calculations*. Moscow, Energiya Publ. 313 (in Russian).
8. Ivashchkin V. V., Bohaslauchyk P. M., Veremenyuk V. V., Nemeravets O. V. (2022) Theoretical Foundations for Calculating the Erosion of Soil Dams during Overflow of Water over the Ridge. *Energetika. Proceedings of CIS higher education institutions and power engineering associations*. 65 (3), 276–284. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2022-65-3-276-284> (in Russian).
9. Bogoslavchik P. M. (1989) Towards the Determination of the Roughness Coefficient When Calculating the Erosion of Soil Inserts. *Vodnoye Khozyaistvo i Gidrotekhnicheskoye Stroitelstvo: Resp. mezhvedomstv. sb. Vyp. 18* [Water Management and Hydraulic Engineering: Republican Interdepartmental Collection. Iss. 18]. Minsk, Vysheyshaya Shkola Publ., 74–76 (in Russian).
10. Goncharov V. L. (1962) *Dynamics of Channel Flows*. Leningrad, Gidrometeizdat Publ. 373 (in Russian).

Received: 18.12.2023

Accepted: 20.02.2024

Published online: 30.09.2024