

ГИДРАВЛИКА И ИНЖЕНЕРНАЯ ГИДРОЛОГИЯ

Научная статья

УДК 627.831:532.532.3

doi: 10.31774/2712-9357-2022-12-4-384-402

Гидравлический расчет резервного водосброса (водослива с широким порогом)

Вячеслав Николаевич Щедрин¹, Юрий Михайлович Косиченко²,
Александр Васильевич Колганов³

¹Новочеркасск, Российская Федерация

^{2,3}Российский научно-исследовательский институт проблем мелиорации, Новочеркасск,
Российская Федерация

¹kosichenko-11@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6170-0014>

²kosichenko-11@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9648-6441>

³Kolganov49@mail.ru

Аннотация. Цель: проведение гидравлических исследований и расчетов резервного водосбросного сооружения (водослива с широким порогом) каменно-набросной плотины. **Материалы и методы.** Современные исследования показывают, что в открытых руслах режим движения жидкости может быть различным, а граничные поверхности русла в одних случаях следует рассматривать как гидравлически гладкие, в других – как гидравлические шероховатые. В исследовании рассмотрен водослив с широким порогом прямоугольного, а также трапецеидального сечения. Для определения опытного коэффициента расхода резервного водосброса грунтовой каменно-набросной плотины использовались известные зависимости для незатопленных водосливов с широким порогом, полученные А. Р. Березинским и Д. И. Куминым. **Результаты.** По результатам сопоставления расчетных коэффициентов расхода с данными экспериментов других авторов получены близкие значения с данными А. Р. Березинского и Д. Н. Кумина. При этом значения коэффициентов расхода водослива по Березинскому и Кумину находятся в пределах 0,339 и 0,324, что подтверждает их соответствие и высокую точность. Результатами расчета расхода фильтрации через каменную наброску плотины с резервным водосбросом являются расходы фильтрации в пределах 726,81–2260,76 м³/с. **Выводы.** Выполненные расчеты показали, что значения коэффициентов расхода водослива трапецеидального сечения соответствуют данным, полученным А. Р. Березинским и Д. И. Куминым. При этом значения коэффициентов расхода водослива по Березинскому и Кумину находятся в допустимых пределах, что подтверждает их соответствие. Средние скорости потока, проходящие через водослив с широким порогом, составили: для профиля 1 – 3,76 м/с, для профиля 2 – 0,612 м/с, для профиля 3 – 2,13 м/с.

Ключевые слова: резервный водосброс, определение опытного коэффициента расхода, водослив с широким порогом

Для цитирования: Щедрин В. Н., Косиченко Ю. М., Колганов А. В. Гидравлический расчет резервного водосброса (водослива с широким порогом) // Мелиорация и гидротехника. 2022. Т. 12, № 4. С. 384–402. <https://doi.org/10.31774/2712-9357-2022-12-4-384-402>.

HYDRAULICS AND ENGINEERING HYDROLOGY

Original article

Hydraulic calculation of the reserve spillway (broad-crested weir)



Vyacheslav N. Shchedrin¹, Yuriy M. Kosichenko², Aleksandr V. Kolganov³

¹Novocherkassk, Russian Federation

^{2, 3}Russian Scientific Research Institute of Land Improvement Problems, Novocherkassk, Russian Federation

¹kosichenko-11@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6170-0014>

²kosichenko-11@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9648-6441>

³Kolganov49@mail.ru

Abstract. Purpose: to carry out hydraulic studies and calculations of a reserve spillway structure (broad-crested weir) of a rockfill dam. **Materials and methods.** Current studies show that in open channels the regime of fluid movement can be different, and the boundary surfaces of the channel in some cases should be considered as hydraulically smooth, in others – as hydraulically rough. The broad-crested weir of rectangular and trapezoidal section is considered. To determine the experimental discharge coefficient of the reserve spillway of an earth rockfill dam, the known dependences for unflooded broad-crested obtained by A. R. Berezinsky and D. I. Kumin were used. **Results.** Based on the results of comparing the calculated flow coefficients with the experimental data of other authors, close values with the data of A. R. Berezinsky and D. N. Kumin were obtained. At the same time, the values of the discharge coefficients of the water discharge according to Berezinsky and Kumin are in the range of 0.339 and 0.324, which confirms their compliance and high accuracy. The results of the calculation of the filtration flow rate through the rockfill of the dam with a reserve spillway are the filtration flow rates in the range of 726.81–2260.76 m³/s. **Conclusions.** The performed calculations showed that the values of the discharge coefficients of the weir of a trapezoidal section correspond to the data obtained by A. R. Berezinsky and D. I. Kumin. At the same time, the values of the spillway discharge coefficients by Berezinsky and Kumin are within acceptable limits, which confirms their compliance. The average flow velocities passing through the broad-crested weir were: for profile 1 – 3.76 m/s, for profile 2 – 0.612 m/s, for profile 3 – 2.13 m/s.

Keywords: reserve spillway, determination of the experimental discharge coefficient, broad-crested weir

For citation: Shchedrin V. N., Kosichenko Yu. M., Kolganov A. V. Hydraulic calculation of the reserve spillway (broad-crested weir). *Land Reclamation and Hydraulic Engineering*. 2022;12(4):384–402. (In Russ.). <https://doi.org/10.31774/2712-9357-2022-12-4-384-402>.

Введение. Гидротехническое строительство играет большую роль в выполнении народно-хозяйственных планов развития Российской Федерации. Основной задачей в области гидротехнического строительства является обеспечение проектирования, строительства и эксплуатации гидротехнических сооружений.

Актуальность исследования заключается в необходимости проведения гидравлических расчетов водосливов грунтовых плотин в связи с тем, что большинство аварийных ситуаций на гидротехнических сооружениях происходит в период паводков и половодий.

Цель работы – проведение гидравлических исследований и расчетов

резервного водосбросного сооружения (водослива с широким порогом) каменно-набросной плотины.

Материалы и методы. В исследовании рассмотрен водослив с широким порогом прямоугольного, а также трапецеидального сечения.

Следует отметить, что большую работу по изучению водосливов с широким порогом (в т. ч. экспериментальные исследования), а также влияния пространственности их работы провел А. Р. Березинский [1], который рекомендовал учитывать при расчете водосливов поправочные коэффициенты. Помимо этого, Д. И. Куминым [2] проводились экспериментальные исследования сжатия потока и влияния быков, которые изучал А. Р. Березинский [3].

Наибольшее теоретическое значение коэффициента расхода m водослива будет при относительном сжатии потока σ , равном 1, а также коэффициенте скорости φ со значением 1. На основе этого определяется приведенный коэффициент расхода m_r , который равен $m_r = 0,70$. М. Д. Чертоусов рекомендует следующую зависимость для коэффициента расхода водослива m [4]:

$$m = \frac{m_r}{(1 + \sigma^2 m_r^2)^{3/2}},$$

где m_r – приведенный коэффициент расхода водослива;

σ – коэффициент сжатия потока.

Если представить наибольшее теоретическое значение коэффициента расхода при $\sigma = 1$ и $\varphi = 1$, максимальное значение приведенного коэффициента расхода составит $m_r = 0,707$:

$$m = \frac{0,707}{(1 + 0,707^2)^{3/2}} = 0,385.$$

Таким образом, коэффициент расхода водослива с широким порогом получает значение величины, соответствующей максимуму расхода.

Для условий пространственной задачи М. Д. Чертоусов [4] рекомен-

дует в значения коэффициента расхода m вводить поправку на исследование пространственной задачи водослива δ .

При учете пространственной работы водосливов практического профиля А. Р. Березинский [1] рекомендует вводить к модульному коэффициенту расхода дополнительно поправочные коэффициенты на плановое расположение водослива относительно линии быков гидротехнического сооружения и влияние пазовых конструкций. Тогда расчетный коэффициент должен находиться из уравнения следующего вида:

$$m = m_r \cdot \sigma_n \cdot \sigma_f \cdot \sigma_{пл} \cdot \sigma_{пз},$$

где σ_n и σ_f – коэффициенты полноты напора и формы;

$\sigma_{пл}$ – коэффициент планового расположения водослива;

$\sigma_{пз}$ – коэффициент влияния пазовых конструкций, $\sigma_{пз} = 0,975 \dots 0,995$.

Согласно полученному решению М. Д. Чертоусова значение коэффициента расхода учитывает величину $m_r = 0,3$.

В случае плоской задачи, когда относительная ширина пролета водослива будет равна 1, т. е. $b = B$ (b – ширина водослива, м; B – общая длина водослива, м), коэффициент сжатия потока будет равен:

$$\sigma = \frac{H}{H + P_1} = \frac{1}{1 + P_1 / H},$$

где H – напор на гребне водослива, м;

P_1 – высота порога водослива со стороны верхнего бьефа, м.

Найденные расчетные зависимости по М. Д. Чертоусову [4] хорошо согласуются с экспериментальными данными Х. А. Тибара. При этом его экспериментальная зависимость для приведенного коэффициента расхода имеет вид: $m_r = 0,3 + 0,085\sigma$.

А. Р. Березинским [1] и Д. И. Куминым [2] проведены исследования незатопленных водосливов с широким порогом. Водосливы с боковым сжатием или пространственным течением слабо изучены и недостаточно

освещены. Истечение через водослив с широким порогом объясняется боковым сжатием, в т. ч. и на водосливе с широким порогом, по способу Френсиса – Кригера [5].

Задача о водосливе с боковым сжатием отличается достаточно сложным решением. Строгое теоретическое исследование для водосливов с широким порогом будет иметь достаточно сложное и приближенное решение. Принятое допущение о наличии участка с плавноизменяющимся движением является весьма условным. Тогда расчет пропускной способности пространственных водосливов необходимо использовать на водосливах с широким порогом с учетом эмпирических зависимостей, хорошо обоснованных опытами [5].

Значения коэффициента планового расположения водослива зависят от типа профиля и изменяются в пределах $\sigma_{пл} = 0,95...1,02$. Значения коэффициента влияния пазовых конструкций зависят от количества пазовых конструкций и находятся в пределах $\sigma_{пз} = 0,975...0,995$.

Боковое сжатие потока на водосливах рассматривалось научными сотрудниками, а именно: А. Р. Березинским [1], Д. И. Куминым [2], Ф. И. Пикаловым, М. Д. Чертоусовым [4], М. М. Скибой и др. Наиболее полные экспериментальные исследования водосливов с широким порогом были проведены Д. И. Куминым и А. Р. Березинским [1, 2].

Влияние пространственности работы водосливов следует учитывать непосредственно коэффициентом расхода. При этом влияние водосливов необходимо учитывать поправочным коэффициентом K :

$$K = 1 - \frac{a}{\sqrt[3]{0,2 + P_1 / H}} \cdot \sqrt[4]{\frac{l}{B} \left(1 - \frac{l}{B} \right)},$$

где a – коэффициент, принимаемый для прямоугольных водосливов равным $a = 0,19$;

l – длина водослива, м;

B – общая длина водослива, м.

Исследование водосливов с боковым сжатием или пространственных водосливов в литературе практически не рассматривается. Объясняется это сложностью истечения через водослив со стойками, устоями и дамбами. В нормативных документах рекомендуется учитывать влияние бокового сжатия на водосливах с широким порогом по способу Френсиса – Кригера (более правильно его называть способом Базена). Учет бокового сжатия по этому методу осуществляется экспериментально для пространственных водосливов путем сжатия на 0,1 м напора с каждой стороны. Так как авторы проводили учет бокового сжатия на водосливах с острой кромкой, то для расчета водосливов с широким порогом вместо фактической длины водослива эффективней использовать их пролет или сжатую длину водослива.

Коэффициент сжатия потока $\sigma_{сж}$ устанавливается по формуле Френсиса – Кригера:

$$\sigma_{сж} = 1 - n\zeta \cdot \frac{H}{b},$$

где n – число отдельных сжатий, шт.;

ζ – коэффициент формы быков и устоев.

Коэффициент Френсиса – Кригера рекомендуется принимать равным:

- для прямоугольных быков и устоев – 1;
- для полуциркульных быков и устоев – 0,7;
- для криволинейных быков и устоев – 0,4.

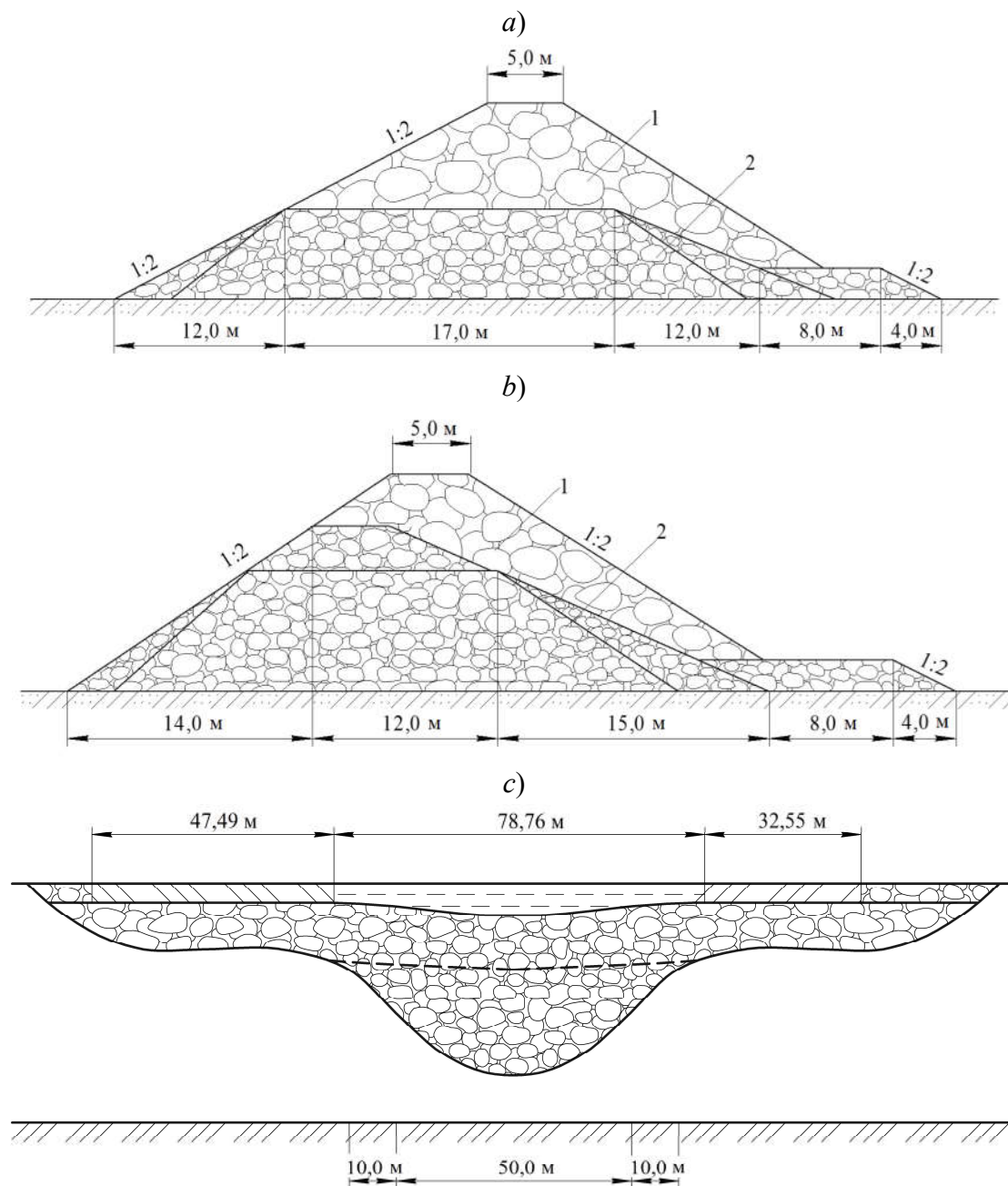
Результаты и обсуждения. Рассмотрим расчет резервного водосброса грунтовой каменно-набросной плотины, работающего как водослив с широким порогом. Поскольку водосливное отверстие резервного водосброса имеет трапецидальное сечение, то его средняя ширина ($b_{ср}$, м) находится по формуле (рисунок 1) [6–10]:

$$b_{ср} = b + m_o h_{тр},$$

где b – ширина водослива по основанию, м;

m_o – коэффициент откоса;

$h_{тр}$ – глубина водослива трапецевидального сечения, м.



a – схема профиля 1; *b* – схема профиля 2; *c* – схема продольного профиля 3;

1 – ремонт временной грунтовой плотины каменной наброской крупной фракции (800–1200 мм); 2 – каменная наброска средней крупности

a – profile diagram 1; *b* – profile 2 scheme; *c* – longitudinal profile 3 scheme; 1 – repair of a temporary earth dam with large rockfill fractions (800–1200 mm); 2 – medium size rockfill

Рисунок 1 – Схемы профилей грунтовой плотины с резервным водосбросом в верхней части плотины

Figure 1 – Diagrams of earth dam profiles with reserve spillway at the top of the dam

С учетом средней ширины водослива b_{cp} , м, зависимость для расхода воды через резервный водосброс примет вид:

$$Q_{рез.в} = (b + m_o h_{тр}) \cdot \sqrt{2g} \cdot H_o^{3/2},$$

где $Q_{рез.в}$ – расход воды через водосброс (водослив с широким порогом), $м^3/с$;

g – ускорение свободного падения, $м/с^2$;

H_o – напор на водосливе с учетом скорости подхода, м.

При использовании опытного коэффициента расхода водосброса трапецеидального сечения $m_{тр}$ его расчетная формула имеет вид [11]:

$$m_{тр} = \frac{Q_{рез.в}}{(b + m_o h_{тр}) \cdot \sqrt{2g} \cdot H_o^{3/2}}. \quad (1)$$

Проведем оценку сопоставимости опытных данных о коэффициенте расхода с экспериментами других авторов (А. Р. Березинского, Д. И. Кумина, М. Д. Чертоусова и др.) по зависимости [11–15]:

$$m_{тр} = \frac{Q_{рез.в}}{(b + m_o h_{пр}) \cdot \sqrt{2g} \cdot H_o^{3/2}}, \quad (2)$$

где $h_{пр}$ – глубина на пороге водослива прямоугольного сечения, м.

При $h_{пр} = h_{кр.пр}$ [7] критическая глубина на пороге водослива с прямоугольным сечением $h_{кр.пр}$, м, вычисляется по формуле:

$$h_{кр.пр} = \sqrt[3]{\frac{\alpha Q_{рез.в}^2}{gb^2}},$$

где α – коэффициент, принимаемый по справочным данным [1, 2];

b – ширина водослива, м.

Подставив значение $h_{кр.пр}$ взамен $h_{пр}$ в формуле (2), получим зависимость для определения опытного коэффициента расхода рассматриваемого резервного водосброса [16]:

$$m_{\text{тр}} = \frac{Q_{\text{рез.в}}}{(b + m_o h_{\text{кр.пр}}) \cdot \sqrt{2g} \cdot H_o^{3/2}}. \quad (3)$$

В процессе исследований водослива с учетом бокового сжатия будем использовать для сравнения эксперименты А. Р. Березинского [1, 17, 18] и Д. И. Кумина [2] (для водосливов с прямоугольным поперечным сечением).

Рассмотрим расчет пропускной способности водослива для трапецеидального сечения [19–22].

Профиль 1 (рисунок 1а): $B_1 = (13,7 - 10,5) \times 12,0 = 38,4$ м.

Профиль 2 (рисунок 1б): $B_2 = (13,7 - 10,5) \times 17,0 = 54,4$ м.

Профиль 3 (рисунок 1с): $B_3 = (13,7 - 10,5) \times 12,0 = 38,4$ м.

Здесь B_1 , B_2 , B_3 вычисляются по формулам, приведенным в работах А. Р. Березинского, Д. И. Кумина [1, 2].

Определим коэффициент расхода водослива трапецеидального сечения по формуле А. Р. Березинского [1, 14]:

$$m_{\text{тр}} = \frac{800}{93,07 \cdot \sqrt{2 \cdot 9,81} \cdot 3,20^{3/2}} = 0,339.$$

Рассчитаем критическую глубину на пороге водослива с прямоугольным сечением ($h_{\text{кр.пр}}$):

$$h_{\text{кр.пр}} = \sqrt[3]{\frac{\alpha Q_{\text{рез.в}}^2}{g \cdot b^2}} = \sqrt[3]{\frac{1,1 \cdot Q_{\text{рез.в}}^2}{g \cdot b^2}} = \sqrt[3]{\frac{1,1 \cdot 800^2}{9,81 \cdot 6,67^2}} = 11,73 \text{ м.}$$

Тогда для профиля 1 получим значения коэффициента расхода ($m_{\text{тр}}$) (по формуле (3)), близкие к результатам расчета по формуле Д. И. Кумина (1) [2]:

$$m_{\text{тр}} = \frac{Q_{\text{рез.в}}}{(b + m_o h_{\text{кр.пр}}) \cdot \sqrt{2g} \cdot H_o^{3/2}} = \frac{800}{97,44 \cdot \sqrt{2 \cdot 9,81} \cdot 3,2^{3/2}} = 0,324.$$

Максимальное значение коэффициента расхода через водослив трапецеидального сечения с широким порогом получено равным $m_{\text{тр}} = 0,407$,

что незначительно отличается от результатов расчета по формуле А. Р. Березинского [20].

Далее представим расчет пропускной способности резервного водосброса с широким порогом по формуле [17, 18, 21]:

$$Q_{\text{рез.в}} = m_{\text{тр}}(b + m_o h_{\text{тр}}) \cdot \sqrt{2g} \cdot H_o^{3/2},$$

- по А. Р. Березинскому: $m_{\text{тр}} = 0,397$ при $\varphi = 0,990$;

- по Ф. И. Пикалову (для водослива прямоугольного сечения): $m_{\text{пр}} = 0,339 \dots 0,353$ при $\varphi = 0,915$;

- по Д. И. Кумину (для водослива прямоугольного сечения): $m_{\text{пр}} = 0,342 \dots 0,376$ при $\varphi = 0,970$;

- по М. Д. Чертоусову: $m_{\text{пр}} = 0,320 \dots 0,368$ при $\varphi = 0,915 \dots 0,97$.

Относительное сжатие потока определяется как: $\sigma = \frac{b}{B} = \frac{17,0}{78,76} = 0,216$, где $b = 17,0$ м, а общая длина водослива составляет $B = 78,76$ м.

Найдем пропускную способность с учетом общей длины водослива по зависимости:

$$Q_{\text{рез.в}} = m_{\text{тр}}(B + m_o h_{\text{тр}}) \cdot \sqrt{2g} \cdot H^{3/2}.$$

Вариант 1: $Q_{\text{рез.в}} = 0,339 \cdot (78,76 + 2 \cdot 3,2) \cdot \sqrt{2 \cdot 9,81} \cdot 3,0^{3/2} = 664,46 \text{ м}^3/\text{с}.$

Вариант 2: $Q_{\text{рез.в}} = 0,339 \cdot (78,76 + 2 \cdot 3,2) \cdot \sqrt{2 \cdot 9,81} \cdot 6,0^{3/2} = 1879,37 \text{ м}^3/\text{с}.$

Вариант 3: $Q_{\text{рез.в}} = 0,339 \cdot (78,76 + 2 \cdot 3,2) \cdot \sqrt{2 \cdot 9,81} \cdot 9,0^{3/2} = 3452,62 \text{ м}^3/\text{с}.$

Вариант 4: $Q_{\text{рез.в}} = 0,339 \cdot (78,76 + 2 \cdot 3,2) \cdot \sqrt{2 \cdot 9,81} \cdot 2,0^{3/2} = 361,68 \text{ м}^3/\text{с}.$

Определим гидравлическую крупность наносов ω , мм/с [22]:

$$\omega = \sqrt{\frac{2g(\gamma_1 - \gamma) \cdot d}{1,75\gamma}},$$

где γ_1 – удельный вес частиц наносов, кг/м³;

γ – удельный вес воды, кг/м³;

d – диаметр частиц грунта, м.

Гидравлическая крупность наносов (по В. Н. Гончарову):

- при $d = 5...6$ мм $\omega = 300$ мм/с;

- при $d = 10$ мм $\omega = 425$ мм/с.

Расчет плотности частиц грунта ω' , г/см³, выполняется по зависимости [22]:

$$\omega' = \sqrt{dg \frac{\rho_n - \rho}{\rho}},$$

где ρ_n – плотность наносов, г/см³;

ρ – плотность воды, г/см³.

Формула средней мутности потока Г. В. Лопатиной ρ_{cp} , г/м³ [22]:

$$\rho_{cp} = \frac{4\sqrt{h} \cdot i}{n_p^2 \omega},$$

где h – средняя глубина потока, м;

i – продольный уклон потока ($i = 0,1$);

n_p – коэффициент шероховатости русла ($n_p = 0,045$);

ω – гидравлическая крупность взвешенных наносов.

Расход фильтрации через каменную наброску сооружения Q_ϕ , м³/с, при средней мутности потока $\rho_{cp} = 0,609$ г/м³ вычислим как [22]:

$$Q_\phi = \rho_{cp} \cdot m_{тр} (B + m_o h_{тр}) \cdot \sqrt{2g} \cdot H^{3/2},$$

$$Q_\phi = 0,609 \cdot 0,339 \cdot (78,76 + 2 \cdot 3,2) \cdot \sqrt{2 \cdot 9,81} \cdot 3,2^{3/2} = 445,79 \text{ м}^3/\text{с}.$$

Для определения ширины водосливного отверстия b , м, используем формулу для резервного водосброса [6, 8]:

$$b = \frac{Q_{рез.в}}{m_{пр} \sqrt{2g} \cdot H^{3/2}} - m_o \cdot h_{тр}, \quad (4)$$

где $Q_{\text{рез.в}}$ – расход через водосброс, $\text{м}^3/\text{с}$, который определяется как:

$$Q_{\text{рез.в}} = Q_{\text{УВБ1}} - Q_{\text{УВБ2}} = 1050 - 250 = 800 \text{ м}^3/\text{с},$$

где $Q_{\text{УВБ1}}$ – максимальный расход воды при переливе через гребень водосливного отверстия, $\text{м}^3/\text{с}$;

$Q_{\text{УВБ2}}$ – средний расход воды при переливе через гребень водосливного отверстия, $\text{м}^3/\text{с}$;

$h_{\text{тр}}$ – высота порога водослива трапецидального сечения, $h_{\text{тр}} = 6,7 \text{ м}$;

$m_{\text{пр}}$ – коэффициент расхода водослива прямоугольного сечения;

H – напор на водосливе, $H = 6,7 \text{ м}$;

Тогда ширина водосливного отверстия резервного водосброса после подстановки соответствующих значений параметров в формулу (4) будет равна:

$$b = \frac{800}{0,361 \cdot \sqrt{19,62 \cdot 6,7^{3/2}}} - 2 \cdot 6,7 = 15,13 \text{ м}.$$

Далее определим коэффициент расхода водосливного отверстия по формуле (1) с учетом высоты плотины $P_1 = 10,5 \text{ м}$ (коэффициент заложения верхового откоса $m_0 = 2,0$).

Тогда коэффициент расхода для профиля 1 составит:

$$m_{\text{пр}} = \frac{800}{28,85 \cdot 4,43 \cdot 17,34} = 0,361.$$

По полученным данным коэффициент расхода будет равным $m_{\text{пр}} = 0,361$, что также близко к данным, полученным по формуле А. Р. Березинского [1].

Выполним расчет расхода фильтрации через каменную наброску в зависимости от профиля [22]:

- профиль 1:

$$Q_{\text{ф}} = 0,609 \cdot 0,339 \cdot (78,76 + 2 \cdot 8,0) \cdot \sqrt{2 \cdot 9,81 \cdot 5,7^{3/2}} = 1179,2 \text{ м}^3/\text{с};$$

- профиль 2:

$$Q_{\text{рез.в}} = 0,609 \cdot (78,76 + 2 \cdot 4,5) \cdot \sqrt{2 \cdot 9,81} \cdot 4,5^{3/2} = 2260,76 \text{ м}^3/\text{с};$$

- профиль 3:

$$Q_{\text{рез.в}} = 0,609 \cdot 0,339 \cdot (78,76 + 2 \cdot 2,25) \cdot \sqrt{2 \cdot 9,81} \cdot 4,5^{3/2} = 726,81 \text{ м}^3/\text{с};$$

- профиль 4:

$$Q_{\text{рез.в}} = 0,609 \cdot (78,76 + 2 \cdot 4,5) \cdot \sqrt{2 \cdot 9,81} \cdot 4,5^{3/2} = 2260,76 \text{ м}^3/\text{с}.$$

Близкие результаты расчета расхода фильтрации получены по профилям 2 и 4, для этих профилей расход составил 2260,76 м³/с. Для профилей 1 и 3 расходы фильтрации через каменную наброску значительно отличаются: для профиля 1 расход примерно на 38 % превышает расход фильтрации профиля 3.

Определение пропускной способности наброски как водослива Q , м³/с [7, 22]:

$$Q = m \cdot B_{\text{н}} \cdot \sqrt{2g} \cdot H^{3/2} = 0,339 \cdot 78,76 \cdot \sqrt{19,62} \cdot 4,5^{3/2} = 1128,9 \text{ м}^3/\text{с},$$

где m – коэффициент расхода;

$B_{\text{н}}$ – длина фронта наброски, м.

На рисунке 2 представлена схема перекрытия потока каменной наброской.

Удельный фильтрационный расход через наброску $q_{\text{ф}}$, м²/с, определим по формуле С. В. Избаша:

$$q_{\text{ф}} = h_1 \cdot K_{\text{тф}} \cdot \sqrt{i_{\text{ф}}},$$

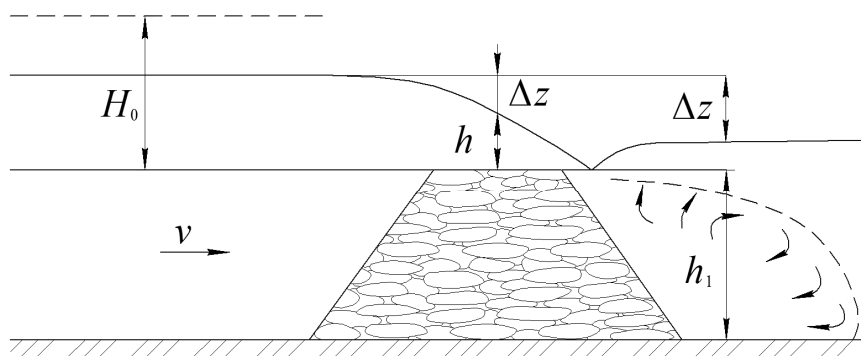
где h_1 – глубина фильтрационного потока, м;

$K_{\text{тф}}$ – коэффициент турбулентной фильтрации, м/с;

$i_{\text{ф}}$ – средний гидравлический уклон потока:

$$i_{\text{ф}} = \frac{\Delta z}{1,7 \cdot h_1},$$

где Δz – разница уровней воды, м.



H_0 – напор на водосливе с учетом скорости подхода, м; h – средняя глубина потока, м;
 Δz – разница уровней воды, м; v – скорость движения водного потока, м/с;
 h_1 – глубина фильтрационного потока, м
 H_0 – head on the spillway, taking into account the approach speed, m; h – the average flow depth, m; Δz – the difference in water levels, m; v – the speed of the water flow, m/s;
 h_1 – filtration flow depth, m

Рисунок 2 – Перекрытие потока каменной наброской
Figure 2 – Blocking the flow with rockfill

Коэффициент турбулентной фильтрации $K_{\text{тф}}$, см/с (при $Re > Re_{\text{кр}}$):

$$K_{\text{тф}} = n_r (20 - a/D) \sqrt{D},$$

где n_r – пористость грунта при эквивалентном диаметре $D = 50$ см;

a – коэффициент для круглой формы, $a = 14$ (при пористости $n_r = 0,4$).

$$K_{\text{тф}} = 0,4(20 - 14/50)\sqrt{50} = 55,86 \text{ см/с} = 0,5586 \text{ м/с}.$$

Средний гидравлический уклон фильтрационного потока:

$$i_{\text{ф}} = \frac{350}{1,7 \cdot 200} = 1,03,$$

где $h_1 = 200$ см, тогда $q_{\text{ф}} = 0,2 \cdot 0,5586 \sqrt{1,03} = 0,1134 \text{ м}^2/\text{с}$.

Для профиля 1 выполнен расчет коэффициента расхода водослива $m_{\text{тр}}$ для трапецеидального сечения по формуле А. Р. Березинского, для профиля 2 – по формуле Д. И. Кумина. В таблице 1 представлены результаты расчетов водосливов с широким порогом для трапецеидального сечения. Полученные значения показывают хорошую сходимость результатов А. Р. Березинского и Д. И. Кумина.

Таблица 1 – Результаты расчетов коэффициента расхода резервного водосброса (водослива с широким порогом)

Table 1 – Calculation results of the discharge coefficient of the reserve spillway (broad-crested weir)

По А. Р. Березинскому										
$Q_{рез.в}, м^3/с$	400	500	450	410	385	370	431	310	230	215
$m_{тр}$	0,659	0,575	0,473	0,431	0,405	0,390	0,410	0,16	0,241	0,226
По Д. И. Кумину										
$Q_{рез.в}, м^3/с$	425	400	346	450	532	351	230	370	670	510
$m_{тр}$	0,801	0,754	0,652	0,849	0,582	0,532	0,395	0,636	1,149	0,949
Принято: $Q_{рез.в}$ – расход резервного водосброса, $м^3/с$; $m_{тр}$ – коэффициент расхода водосброса.										

Сопоставление значений коэффициента расхода водосливов (Ф. И. Пикалова, М. Д. Чертоусова, А. Х. Тибара, А. Р. Березинского, Д. И. Кумина, Б. А. Бахметева, Н. Н. Павловского, А. Н. Ахутина, М. М. Скибы и др.) показало, что наилучшие результаты давала формула А. Р. Березинского. Теоретическое решение задачи об истечении пространственного потока через водослив с широким порогом предложили М. Д. Чертоусов и Д. И. Кумин. Однако Д. И. Кумин изучил стеснение потока на водосливах с нулевой высотой порога, что отличает его эксперименты от М. Д. Чертоусова. А. Р. Березинский выполнил тщательные исследования, дающие возможность определить повышенные коэффициенты расхода для любого размера. В частности, им получены коэффициенты входной острой кромки порога в виде:

$$m_o = 0,32 + \frac{3 - P_1/H}{46 + 75 \cdot P_1/H}.$$

Для скругленной входной кромки порога была получена зависимость:

$$m_o = 0,32 + \frac{3 - P_1/H}{120 + 150 \cdot P_1/H}.$$

Подставляя исходные данные к расчету коэффициента расхода, получим следующие результаты:

- при $P_1/H = 1,44$ – формула А. Р. Березинского:

$$m_o = 0,32 + \frac{3 - 1,44}{46 + 75 \cdot 1,44} = 0,330;$$

- при $P_1/H = 0,70$ – формула Д. И. Кумина:

$$m_o = 0,36 + \frac{3 - 0,70}{120 + 150 \cdot 0,70} = 0,370.$$

Выводы

1 Расчеты коэффициентов расхода водослива с широким порогом показали, что их значения (для трапецеидального сечения водослива) соответствуют данным, полученным А. Р. Березинским и Д. И. Куминым. При этом значения коэффициентов расхода водослива по Березинскому и Кумину находятся в пределах 0,339 и 0,324, что подтверждает их соответствие и высокую точность.

2 Средние скорости потока, проходящие через водослив с широким порогом, составили: $U_{\text{пр1}} = 3,76$ м/с, $U_{\text{пр2}} = 0,612$ м/с и $U_{\text{пр3}} = 2,13$ м/с.

3 Расчет расхода фильтрации через каменную наброску показал сходимость результатов для профилей 2 и 4, фильтрационный расход для этих профилей составил 2260,76 м³/с. Для профилей 1 и 3 расходы фильтрации через каменную наброску значительно отличаются: для профиля 1 расход примерно на 38 % превышает расход фильтрации профиля 3.

Список источников

1. Березинский А. Р. Пропускная способность водослива с широким порогом. М.: Стройиздат, 1950. 185 с.
2. Кумин Д. И. Сопряжение бьефов при поверхностном режиме. Л.; М.: Госэнергоиздат, 1948. 124 с.
3. Гурьев А. П., Ханов Н. В., Абидов М. М. Рекомендуются условия работы вихревых водосбросов // Гидротехническое строительство. 2021. № 3. С. 15–21. <http://dx.doi.org/10.34831/EP.2021.11.95.001>.
4. Чертоусов М. Д. Гидравлика: спец. курс. 3-е изд., перераб. и доп. М.; Л.: Госэнергоиздат, 1957. 640 с.
5. Богомолов А. И., Михайлов К. А. Гидравлика: учеб. для вузов. 2-е изд., доп. М.: Стройиздат, 1972. 648 с.
6. Пат. 2573328 Российская Федерация, МПК Е 02 В 7/06, Е 02 В 8/06. Резервный

водосброс грунтового подпорного сооружения (варианты) / Косиченко Ю. М., Михайлов Е. Д., Баев О. А.; заявитель и патентообладатель Юж. науч.-исслед. ин-т гидротехники и мелиорации. № 2014100661/13; заявл. 09.01.14; опубл. 20.01.16, Бюл. № 20. 13 с.

7. Пат. 2668092 Российская Федерация, МПК Е 02 В 7/06, Е 02 В 8/06. Облегченный паводковый резервный водосброс при грунтовой плотине / Ищенко А. В., Баев О. А., Михайлов Е. Д.; заявитель и патентообладатель Дон. гос. аграр. ун-т. № 2017117367; заявл. 18.05.17; опубл. 26.09.18, Бюл. № 27. 10 с.

8. Лобанов Г. Л. Расчет резервного водосброса для пропуска паводковых расходов // Научный журнал Российского НИИ проблем мелиорации [Электронный ресурс]. 2016. № 4(24). С. 202–213. URL: <http://www.rosniipm-sm.ru/article?n=1123> (дата обращения: 15.08.2022).

9. Абдразаков Ф. К., Панкова Т. А., Орлова С. С. Оценка степени риска аварии на гидроузле // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В. Г. Шухова. 2018. № 7. С. 34–41. DOI: 10.12737/article_5b4f02b785cf25.07598976.

10. Косарев С. Г. Методика расчета развития прорана в теле однородных земляных намывных плотин вследствие возникновения аварийных ситуаций // Гидротехническое строительство. 2012. № 4. С. 17–20.

11. Симонян Д. М., Родионов М. В. Резервные водосбросы с размываемой вставкой в теле грунтовой плотины // Традиции и инновации в строительстве и архитектуре. Строительство: сб. ст. / Сам. гос. архитектур.-строит. ун-т. Самара, 2017. С. 249–253.

12. Дерюгин Г. К. Рекомендации по гидравлическому расчету водосливов. Прямые водосливы. Л.: Энергия, 1974. Ч. 1. 58 с.

13. Гурьев А. П., Ханов Н. В., Ершов К. С. Влияние планового расширения водослива с горизонтальной вставкой на его пропускную способность // Природообустройство. 2010. № 5. С. 42–46.

14. Теоретические основы расчета размыва грунтовых плотин при переливе воды через гребень / В. В. Ивашечкин, П. М. Богославчик, В. В. Верременюк, О. В. Немеровец // Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. 2022. Т. 65, № 3. С. 276–284. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2022-65-3-276-284>.

15. Alternative solutions for the energy dissipation of idle discharges at the Rogun HPP / A. P. Gur'ev, N. A. Safonova, D. V. Kozlov, N. V. Khanov, M. M. Abidov // Power Technology and Engineering. 2020. Vol. 54, № 1. P. 7–12. DOI: 10.1007/s10749-020-01157-3.

16. Бальзанныков М. И., Родионов М. В., Сеницкий Ю. Э. Повышение эксплуатационной надежности низконапорных гидротехнических объектов с грунтовыми плотинами // Приволжский научный журнал. 2012. № 2. С. 35–40.

17. Березинский А. Р. Гидротехнические сооружения. М.: Энергия, 1965. 185 с.

18. Березинский А. Р. Пропускная способность водосливов // Гидротехническое строительство. 1951. № 3. С. 29–35.

19. Пономарчук К. Р. Оценка параметров развития прорана при разрушении грунтовой плотины // Природообустройство. 2011. № 3. С. 77–82.

20. Косиченко Ю. М., Михайлов Е. Д., Баев О. А. Экспериментальные исследования водослива с широким порогом резервного водосброса // Вестник СГАСУ. Градостроительство и архитектура. 2015. № 3(20). С. 73–81.

21. Агроскин И. И., Дмитриев Г. Т., Пикалов Ф. И. Гидравлика / под ред. И. И. Агроскина. 2-е изд., перераб. и доп. М.; Л.: Госэнергоиздат, 1950. 440 с.

22. Справочник по гидравлическим расчетам / П. Г. Киселев [и др.]; под ред. П. Г. Киселева. 4-е изд., перераб. и доп. М.: Эколит, 2011. 312 с.

References

1. Berezinsky A.R., 1950. *Propusknaya sposobnost' vodosliva s shirokim porogom* [Carrying Capacity of a Broad-crested Weir]. Moscow, Stroyizdat Publ., 185 p. (In Russian).

2. Kumin D.I., 1948. *Sopryazhenie b'efov pri poverkhnostnom rezhime* [Conjugation of Pools in Surface Conditions]. Leningrad, Moscow, Gosenergoizdat Publ., 124 p. (In Russian).
3. Gur'ev A.P., Khanov N.V., Abidov M.M., 2021. *Rekomenduemye usloviya raboty vikhrevykh vodosbrosov* [Recommended conditions for the operation of vortex spillways]. *Gidrotekhnicheskoe stroitel'stvo* [Power Technology and Engineering], no. 3, pp. 15-21, <http://dx.doi.org/10.34831/EP.2021.11.95.001>. (In Russian).
4. Chertousov M.D., 1957. *Gidravlika* [Hydraulics]. 3rd ed., Moscow, Leningrad, State Energy Publ., 640 p. (In Russian).
5. Bogomolov A.I., Mikhailov K.A., 1972. *Gidravlika* [Hydraulics: textbook]. 2nd ed., Moscow, Stroyizdat Publ., 648 p. (In Russian).
6. Kosichenko Yu.M., Mikhailov E.D., Baev O.A., 2014. *Rezervnyy vodosbros gruntovogo podpornogo sooruzheniya (varianty)* [Reserve Spillway of a Soil Retaining Structure (Options)]. Patent RF, no. 2573328. (In Russian).
7. Ishchenko A.V., Baev O.A., Mikhailov E.D., 2018. *Oblegchennyy pavodkovyy rezervnyy vodosbros pri gruntovoy plotine* [Light Weight Flood Reserve Spillway at Earth Dam]. Patent RF, no. 2668092. (In Russian).
8. Lobanov G.L., 2016. [Calculation of reserve spillway for passing flood discharges]. *Nauchnyy zhurnal Rossiyskogo NII problem melioratsii*, no. 4(24), pp. 202-213, available: <http://www.rosniipm-sm.ru/article?n=1123> [accessed 15.08.2022]. (In Russian).
9. Abdrazakov F.K., Pankova T.A., Orlova S.S., 2018. *Otsenka stepeni riska avarii na gidrouzle* [Assessment of the degree of risk of accidents at a waterworks]. *Vestnik Belgorodskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta im. V. G. Shukhova* [Bulletin of Belgorod State Technological University named after Shukhov V.G.], no. 7, pp. 34-41, DOI: 10.12737/article_5b4f02b785cf25.07598976. (In Russian).
10. Kosarev S.G., 2012. *Metodika rascheta razvitiya prorana v tele odnorodnykh zemlyanykh namyynykh plotin vsledstvie vozniknoveniya avariynykh situatsiy* [Method of calculating the development of a hole in the body of homogeneous earth-fill dams due to the occurrence of emergency situations]. *Gidrotekhnicheskoe stroitel'stvo* [Power Technology and Engineering], no. 4, pp. 17-20. (In Russian).
11. Simonyan D.M., Rodionov M.V., 2017. *Rezervnye vodosbrosty s razmyvaemoy vstavkoy v tele gruntovoy plotiny* [Reserve spillways with an eroded insert in the body of an earth dam]. *Traditsii i innovatsii v stroitel'stve i arkhitekture. Stroitel'stvo: sb. st.* [Traditions and Innovations in Construction and Architecture. Construction: coll. of articles]. Samara, pp. 249-253. (In Russian).
12. Deryugin G.K., 1974. *Rekomendatsii po gidravlicheskomu raschetu vodoslivov. Pryamy vodoslivy* [Recommendations for the Hydraulic Calculation of Weirs. Direct Weirs]. Leningrad, Energy Publ., pt. 1, 58 p. (In Russian).
13. Gur'ev A.P., Khanov N.V., Ershov K.S., 2010. *Vliyanie planovogo rasshireniya vodosliva s gorizontal'noy vstavkoy na ego propusknuyu sposobnost'* [Influence of planned expansion of a spillway with a horizontal insert on its carrying capacity]. *Prirodoobustroystvo* [Environmental Engineering], no. 5, pp. 42-46. (In Russian).
14. Ivashechkin V.V., Bogoslavchik P.M., Veremenyuk V.V., Nemerovets O.V., 2022. *Teoreticheskie osnovy rascheta razmyva gruntovykh plotin pri perelive vody cherez greben'* [Theoretical foundations for calculating the erosion of soil dams during water overflows over the ridge]. *Energetika. Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy i energeticheskikh ob'edineniy SNG* [Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations], vol. 65, no. 3, pp. 276-284, <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2022-65-3-276-284>. (In Russian).
15. Gur'ev A.P., Safonova N.A., Kozlov D.V., Khanov N.V., Abidov M.M., 2020. Alternative solutions for the energy dissipation of idle discharges at the Rogun HPP. *Power Technology and Engineering*, vol. 54, no. 1, pp. 7-12, DOI: 10.1007/s10749-020-01157-3.

16. Balzannikov M.I., Rodionov M.V., Senitsky Yu.E., 2012. *Povyshenie ekspluatatsionnoy nadezhnosti nizkonapornykh gidrotekhnicheskikh ob"ektov s gruntovymi plotinami* [Improving the operational reliability of low-pressure hydraulic facilities with earth dams]. *Privolzhskiy nauchnyy zhurnal* [Privolzhsky Scientific Journal], no. 2, pp. 35-40. (In Russian).
 17. Berezinsky A.R., 1965. *Gidrotekhnicheskie sooruzheniya* [Hydraulic Structures]. Moscow, Energy Publ., 185 p. (In Russian).
 18. Berezinsky A.R., 1951. *Propusknaya sposobnost' vodoslivov* [Capacity of weirs]. *Gidrotekhnicheskoe stroitel'stvo* [Power Technology and Engineering], no. 3, pp. 29-35. (In Russian).
 19. Ponomarchuk K.R., 2011. *Otsenka parametrov razvitiya prorana pri razrushenii gruntovoy plotiny* [Assessment of parameters of closure channel development at destruction of earth dams]. *Prirodoobustroytvo* [Environmental Engineering], no. 3, pp. 77-82. (In Russian).
 20. Kosichenko Yu.M., Mikhailov E.D., Baev O.A., 2015. *Eksperimentalnye issledovaniya vodosliva s shirokim porogom rezervnogo vodosbrosa* [Experimental studies of a spillway with a wide threshold of a reserve spillway]. *Vestnik SGASU. Gradostroitel'stvo i arhitektura* [Bulletin of SGASU. Town Planning and Architecture], no. 3(20), pp. 73-81. (In Russian).
 21. Agroskin I.I., Dmitriev G.T., Pikalov F.I., 1950. *Gidravlika* [Hydraulics]. 2nd ed., rev., Moscow, Leningrad, Gosenergoizdat Publ., 440 p. (In Russian).
 22. Kiselev P.G. [et al.], 2011. *Spravochnik po gidravlicheskim raschetam* [Handbook of Hydraulic Calculations]. 4th ed., rev., Moscow, Ekolit Publ., 312 p. (In Russian).
-

Информация об авторах

В. Н. Щедрин – доктор технических наук, академик РАН, профессор;
Ю. М. Косиченко – главный научный сотрудник, доктор технических наук, профессор;
А. В. Колганов – доктор технических наук, профессор.

Information about the authors

V. N. Shchedrin – Doctor of Technical Sciences, Academician of the Russian Academy of Sciences, Professor;
Yu. M. Kosichenko – Chief Researcher, Doctor of Technical Sciences, Professor;
A. V. Kolganov – Doctor of Technical Sciences, Professor.

*Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.
Все авторы в равной степени несут ответственность при обнаружении плагиата, самоплагиата и других нарушений в сфере этики научных публикаций.*

*Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.
All authors are equally responsible for detecting plagiarism, self-plagiarism and other ethical violations in scientific publications.*

*Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
The authors declare no conflicts of interest.*

*Статья поступила в редакцию 06.09.2022; одобрена после рецензирования 18.10.2022;
принята к публикации 20.10.2022.*

The article was submitted 06.09.2022; approved after reviewing 18.10.2022; accepted for publication 20.10.2022.