

АКТУАЛЬНЫЕ НАУЧНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ В ОБЛАСТИ МЕЛИОРАЦИИ И ГИДРОТЕХНИКИ

Научная статья

УДК 502/504:627.83

Методика проведения лабораторных исследований вакуумного шахтного гасителя энергии

Даниил Андреевич Алексеев¹, Нартмир Владимирович Ханов²,
Лариса Сергеевна Дейнеко³, Татьяна Юрьевна Жукова⁴,
Анастасия Александровна Кадысева⁵

^{1, 2, 3, 4, 5}Российский государственный аграрный университет –

МСХА имени К. А. Тимирязева, Москва, Российская Федерация

¹daniil.alekseev@rgau-msha.ru, <https://orcid.org/0009-0009-1890-3471>

²khanov@rgau-msha.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5764-4734>

³larissa-ser@yandex.ru, <https://orcid.org/0009-0000-3989-3350>

⁴t.zhukova@rgau-msha.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9654-3039>

⁵kadyseva@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8703-5684>

Аннотация. Цель: разработка методики проведения лабораторных исследований на модели шахтного водосброса Рогунской ГЭС, ориентированной на решение вопроса гашения энергии потока воды с использованием вакуума. **Материалы и методы.** Выбор оптимальной конструкции гасителя энергии на водосбросных сооружениях является первостепенной задачей. На гидротехнических водосбросных сооружениях для поддержания оптимальных параметров сопряжения бьефов необходимо использовать различные конструкции гашения энергии и конструкции для предотвращения образования вакуума на водосливах. В настоящее время существует большое количество конструкций, выполняющих роль гашения энергии, но ни одна из них не предусматривает возможность использования вакуума как одного из факторов гашения избыточной энергии потока. Использование вакуумных процессов, которые могут образовываться во водосбросных сооружениях, является альтернативным решением гашения энергии потока воды другим используемым конструкциям. В статье рассмотрены особенности модельной установки шахтного водосброса Рогунской ГЭС, а также методика проведения лабораторных испытаний на модели водосброса с определением гидравлических характеристик. **Результаты.** На основании экспериментальных исследований оценена работа шахтного водосброса Рогунской ГЭС, включая эффективность гашения энергии потока; диапазон расходов, в котором возможно использование конструкции, допустимые характеристики вакуума. **Выводы.** Проведенные экспериментальные исследования для модели шахтного водосброса Рогунской ГЭС показывают возможность применения методики исследования в процессе модельных экспериментов.

Ключевые слова: шахтные водосбросы, гидродинамическое давление, гасители энергии, вакуум, энергия потока

Апробация результатов исследования: основные положения статьи доложены на Международной научно-практической конференции молодых ученых и специалистов «Актуальные научные исследования в области мелиорации и гидротехники» (г. Новочеркасск, 30 мая 2025 г.).

Для цитирования: Методика проведения лабораторных исследований вакуумного шахтного гасителя энергии / Д. А. Алексеев, Н. В. Ханов, Л. С. Дейнеко, Т. Ю. Жукова, А. А. Кадысева // Пути повышения эффективности орошаемого земледелия. 2025. Т. 96, № 2. С. 155–170.

CURRENT SCIENTIFIC RESEARCH IN THE FIELD OF LAND RECLAMATION AND HYDRAULIC ENGINEERING

Original article

Methodology for conducting laboratory studies of a vacuum shaft energy damper

Daniil A. Alekseev¹, Nartmir V. Khanov², Larisa S. Deineko³,
Tatyana Yu. Zhukova⁴, Anastasia A. Kadyseva⁵

^{1, 2, 3, 4, 5}Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy,
Moscow, Russian Federation

¹daniil.alekseev@rgau-msha.ru, <https://orcid.org/0009-0009-1890-3471>

²khanov@rgau-msha.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5764-4734>

³larissa-ser@yandex.ru, <https://orcid.org/0009-0000-3989-3350>

⁴t.zhukova@rgau-msha.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9654-3039>

⁵kadyseva@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8703-5684>

Abstract. Purpose: to develop a methodology for conducting laboratory studies on the Rogun HPP shaft spillway model, aimed at solving the issue of damping the flow energy of the water using a vacuum. **Materials and methods.** The choice of the optimal design of the energy damper on the spillway structures is a priority task. At hydraulic spillway structures, in order to maintain optimal parameters of the pools coupling, it is necessary to use various energy damping designs and designs to prevent the vacuum formation on the spillways. Currently, there are a large number of designs performing the role of energy damping, but none of them provides for the possibility of using a vacuum as one of the factors in flow excess energy damping. The use of vacuum processes that can be formed in spillway structures is an alternative solution to energy damping of the water flow by other designs used. The features of the model installation of the Rogun HPP shaft spillway, as well as the methodology for conducting laboratory tests on the spillway model to determine the hydraulic characteristics are discussed. **Results.** Based on the experimental studies, the work of the shaft spillway of the Rogun HPP was assessed, including the efficiency of flow energy absorption; the range of flow rates in which the design can be used, and the permissible vacuum characteristics. **Conclusions.** The experimental studies conducted for the Rogun HPP shaft spillway model show the possibility of using the research methodology in the process of model experiments.

Keywords: shaft spillways, hydrodynamic pressure, energy dampers, vacuum, flow energy

Evaluation of the research results: the fundamental principles of the article were reported at the International Scientific and Practical Conference of Young Scientists and Specialists “Current Scientific Research in the Field of Land Reclamation and Hydraulic Engineering” (Novocherkassk, May 30, 2025).

For citation: Alekseev D. A., Khanov N. V., Deineko L. S., Zhukova T. Yu., Kadyseva A. A. Methodology for conducting laboratory studies of a vacuum shaft energy damper. *Ways of Increasing the Efficiency of Irrigated Agriculture*. 2025;96(2):155–170. (In Russ.).

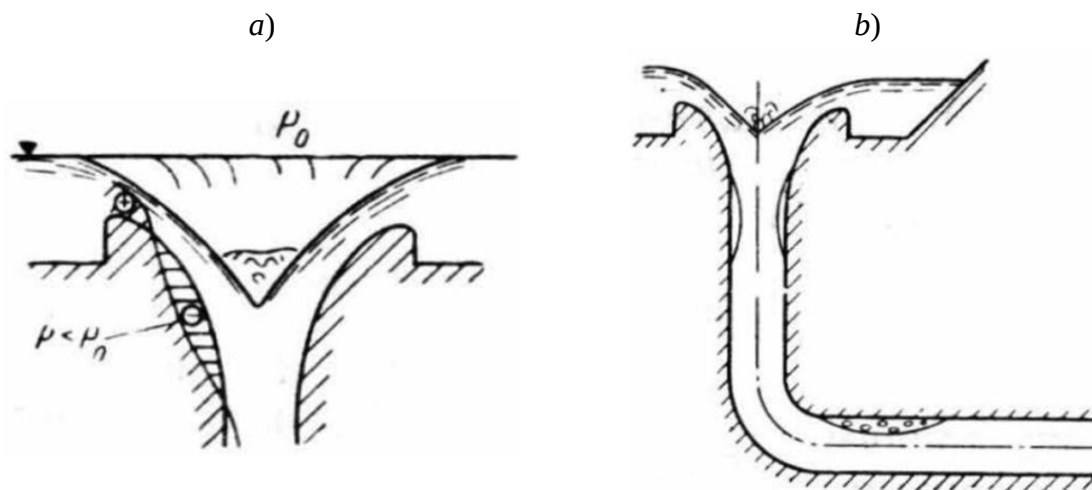
Введение. Экспериментальными и теоретическими исследованиями шахтных водосбросов занимались многие отечественные и зарубежные ученые. С точки зрения проведения экспериментальных лабораторных исследований, связанных с изучением вакуума в водопроводящем тракте вы-

соконапорных водосбросов, представляют интерес работы Н. П. Розанова, А. П. Гурьева, К. К. Шальцева; П. П. Мойса, В. Г. Скрыги, а также многих зарубежных ученых.

П. П. Мойс в брошюре по шахтным водосбросам (выпуск № 15) кратко описывает конструкции шахтных водосбросов, анализирует экспериментальные и теоретические исследования, дает основы методики проектирования и гидравлического расчета шахтных водосбросов.

В материалах П. П. Мойса, Н. П. Розанова и А. П. Гурьева также описываются теоретические и экспериментальные исследования, связанные с изучением вакуума в водопроводящем тракте высоконапорных водосбросов. В большей части работ рассматриваются преимущественно меры борьбы с вакуумом, а не его использование.

В процессе эксплуатации шахтных водосбросов, при гидравлических условиях, отличных от профилирующих, может возникать вакуум [1]. Места возможного образования вакуума показаны на рисунке 1.



- a) при безотрывном обтекании водосливной поверхности воронки; b) при протекании потока с отрывом струи от поверхности и с образованием вихревой зоны
 a) with continuous flow around the funnel spillway surface; b) with flow with separation of the jet from the surface and with the vortex zone formation

Рисунок 1 – Виды вакуумных зон в тракте высоконапорного шахтного водосброса

Figure 1 – Types of vacuum zones in the tract of a high-pressure shaft spillway

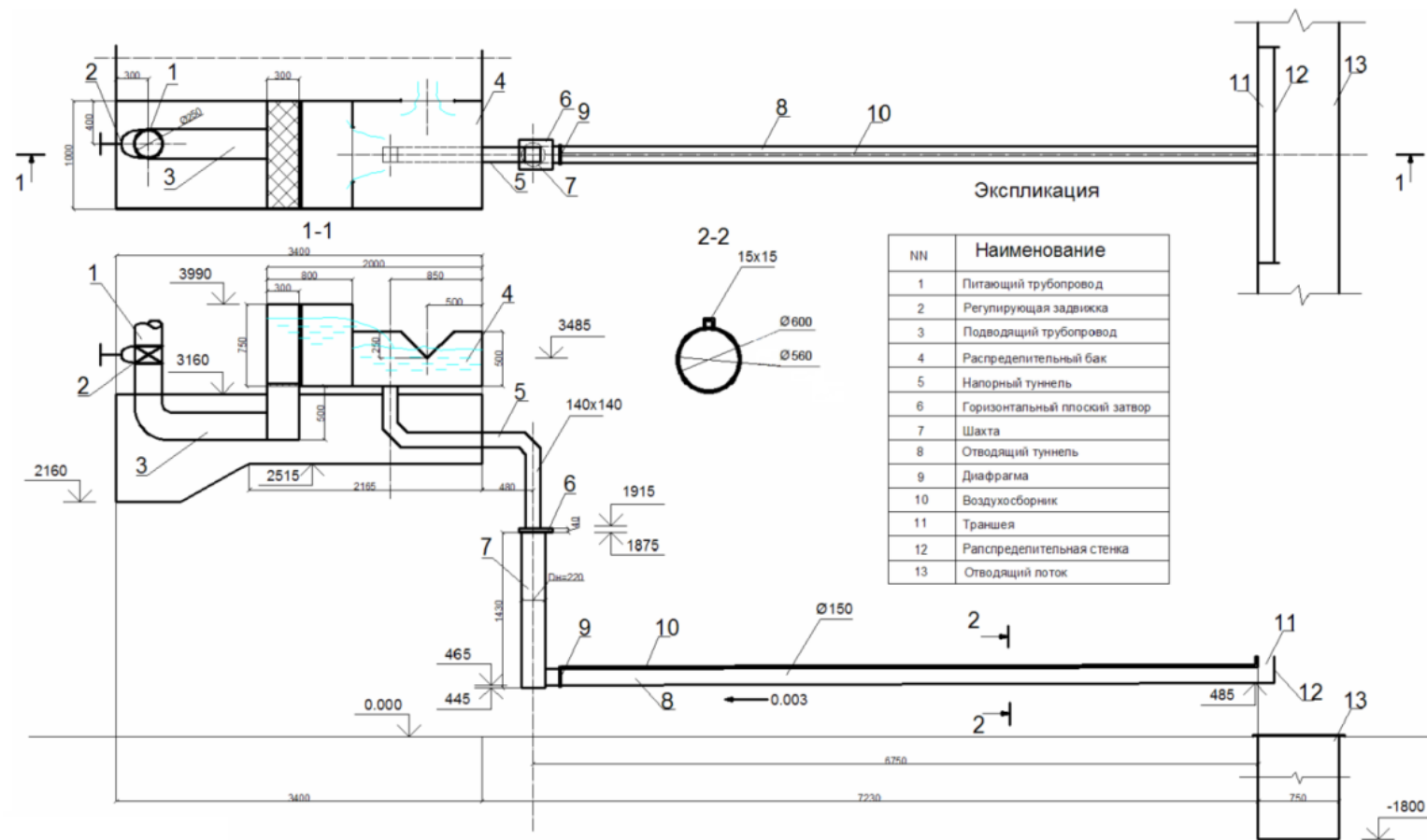
В процессе движения потока в шахте растет градиент давления, что способствует образованию вакуумных зон. Когда достигаются критические значения величин вакуума, воздух из безнапорного туннеля может двигаться в шахту с большой скоростью, что может привести к выбросу брызг из нее на значительную высоту. В качестве примера можно привести шахтный водосброс на дамбе Оахе (США), где наблюдался выброс брызг из шахты в верхний бьеф на высоту 15–18 м при расходах 20–55 м³/с [2].

При изучении зон образования вакуума в шахтных водосбросах принято выделять две зоны образования вакуума: эффективная зона и зона, где образование вакуума не считают полезным и стараются его избегать. Полезной эту зону считают только в том случае, если соблюдается условие допустимой величины вакуума [3, 4]. Конечно, в полезной зоне (рисунок 1а) вакуум влияет на пропускную способность. В другой зоне (рисунок 1б) образование вакуума стараются избежать.

Материалы и методы. В целях определения возможности использования вакуумных процессов, образующихся в шахте водосброса, необходимо провести модельные гидравлические исследования^{1, 2}. Конструкция шахтного водосброса Рогунской ГЭС с гашением энергии сбрасываемого потока в шахте на модели выполнена в масштабе 1:100 натуральной величины в лаборатории водопропускных сооружений кафедры гидротехнических сооружений Института мелиорации, водного хозяйства и строительства имени А. Н. Костякова Российского государственного аграрного университета – МСХА имени К. А. Тимирязева. Принципиальная схема модельной установки приведена на рисунке 2.

¹Инженерный справочник. Таблицы DPVA.ru. Растворимость воздуха в воде. Деаэрация. Закон Генри. Коэффициенты Генри для воздуха [Электронный ресурс]. URL: <https://dpva.ru/guide/guidemedias/guideair/airsolubilityinwater> (дата обращения 29.06.2025).

²Водопропускные гидротехнические сооружения (водосбросные, водоспускные и водовыпускные). Правила проектирования: СП 290.1325800.2016 [Электронный ресурс]: утв. М-ва стр-ва и жилищ.-коммун. хоз-ва Рос. Федерации 16.12.16: введ. в действие 17.06.17. Доступ из ИС «Техэксперт: 6 поколение» Интранет.



1 – питающий водопровод; 2 – регулирующая задвижка; 3 – подводящий трубопровод; 4 – распределительный бак;
5 – напорный туннель; 6 – горизонтальный плоский затвор; 7 – шахта; 8 – отводящий туннель; 9 – диафрагма;
10 – воздухосборник; 11 – траншея; 12 – распределительная стенка; 13 – отводящий лоток

1 – feed water pipeline; 2 – control valve; 3 – supply pipeline; 4 – distribution tank; 5 – pressure tunnel; 6 – horizontal flat gate;
7 – shaft; 8 – discharge tunnel; 9 – diaphragm; 10 – air collector; 11 – trench; 12 – distribution wall; 13 – diversion flume

Рисунок 2 – Принципиальная схема модельной установки водосброса № 3 Рогунской ГЭС

Figure 2 – Schematic diagram of no. 3 spillway installation model of the Rogun HPP

В процессе лабораторного исследования на гидравлической модели шахтного водосброса необходимо проводить измерения гидродинамического давления на стенки напорного участка подводящего водовода, на стенки шахты-гасителя энергии потока и на стенки отводящего туннеля. Определение гидродинамического давления в гидравлической модели осуществлялось с помощью водяных пьезометров [5].

Конструкция пьезометров состоит из приемного отверстия диаметром $d_{отв} = 2$ мм, штуцера, приклеенного на поверхность оргстекла соосно приемному отверстию, резинового шланга с внутренним диаметром 6,0 мм и стеклянной пьезометрической трубки, установленной на щите с миллиметровой шкалой. На рисунке 3 показано размещение пьезометров на модели.

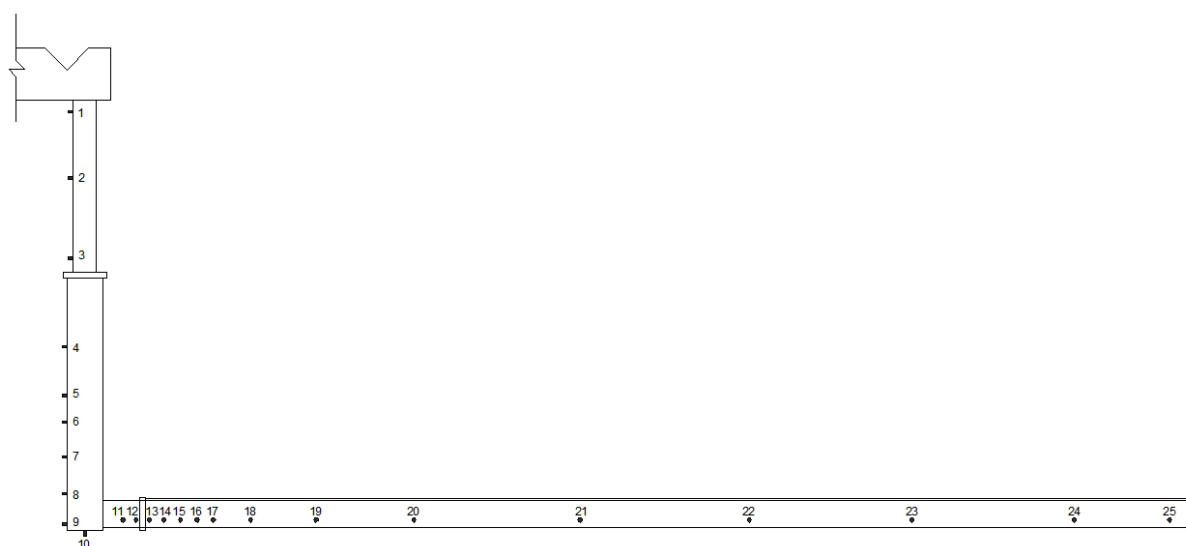


Рисунок 3 – Схема размещения пьезометров на модели водосбросного туннеля Рогунской ГЭС

Figure 3 – Layout of piezometers on the Rogun HPP spillway tunnel model

На подводящем участке напорного туннеля, выше створа размещения затворов, было установлено 3 пьезометра, а на стволе шахты, ниже створа размещения затворов, было установлено 7 пьезометров. Кроме этих пьезометров, для измерения вакуума под затворами, на верхнем участке шахты был дополнительно установлен пьезометр, присоединявшийся на период замеров к U-образному стеклянному вакуумметру, который виден на рисунке 4.



**Рисунок 4 – Пьезометры, установленные на шахте
(автор фото Н. В. Ханов)**

Figure 4 – Piezometers installed in the shaft (photo by N. V. Khanov)



**Рисунок 5 – Фото пьезометрического щита с показаниями пьезометров
(автор фото Н. В. Ханов)**

**Figure 5 – Photo of a piezometric screen with piezometer readings
(photo by N. V. Khanov)**

На модели шахтного водосброса Рогунской ГЭС конструкция напорного бака, шахты гашения энергии с затворной камерой в верхней части и начальный участок отводящего туннеля представлены на рисунке 6.



Рисунок 6 – Головной участок и отводящий туннель модели водосброса Рогунской ГЭС (автор фото Н. В. Ханов)

Figure 6 – The head section and the outlet tunnel of the Rogun hydroelectric power station spillway model (photo by N. V. Khanov)

Также для упрощения конструкции модели и упрощения проведения тестовых испытаний при определении принципиальной работоспособности на рисунке 7 приведено фото затворной камеры с круглым отверстием. На рисунке 8 показана принципиальная схема конструкции горизонтального затвора. Для дальнейших исследований будет использоваться конструкция затворной камеры с двумя затворами, модель которой приведена на фото (рисунок 9).

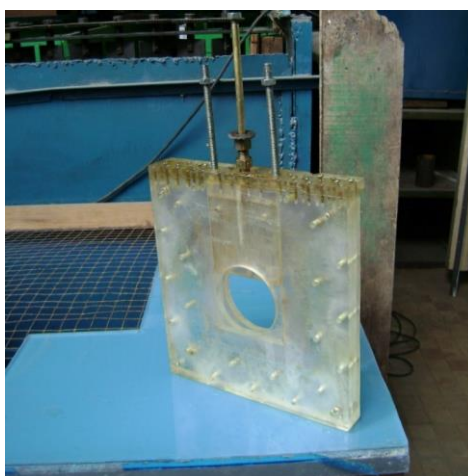
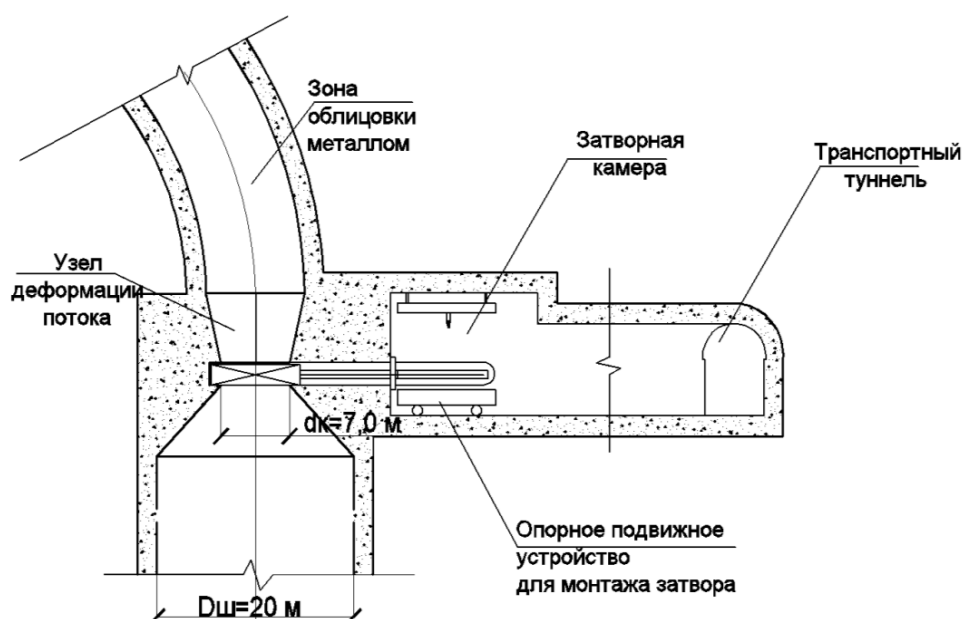


Рисунок 7 – Фото конструкции затворной камеры с круглым отверстием (автор фото Н. В. Ханов)

Figure 7 – Photo of the design of the gate chamber with a round hole (photo by N. V. Khanov)



d_k – условный диаметр прохода затвора; $D_{ш}$ – диаметр шахты
 d_k – nominal diameter of the gate passage; $D_{ш}$ – shaft diameter

Рисунок 8 – Принципиальная схема конструкции горизонтального затвора

Figure 8 – Schematic diagram of the horizontal gate design



Рисунок 9 – Фото конструкции затворной камеры с двумя затворами с острой кромкой (автор фото Н. В. Ханов)

Figure 9 – Photo of the design of the gate chamber with two sharp-edged bolts (photo by N. V. Khanov)

Результаты. Изучение гашения энергии потока в шахте необходимо проводить для трех режимов: со свободным доступом воздуха в шахту; без доступа воздуха в шахту; с дозированной подачей воздуха в шахту в соответствии с возможным количеством его выделения из воды [6, 7].

Полученные данные гидродинамического давления на модели водосброса далее определяются по различным зависимостям. Давление потока на дно шахты может быть определено по зависимости [8–10]:

$$\frac{p_{ш}}{\gamma} = h_{ш} = \frac{4 \cdot \kappa \cdot Q}{\pi \cdot g \cdot d_{ш}^2} \cdot V_c, \quad (1)$$

где $p_{ш}$ – абсолютное давление в шахте, мм вод. ст.;

γ – удельный вес равномерно водовоздушной распределенной смеси в шахте;

$h_{ш}$ – высота шахты над уровнем воды, необходимым для пропуска расхода водосброса, м:

$$h_{ш} = \frac{4 \cdot 1,5 \cdot 2055 \cdot \bar{a} \cdot 0,8}{\pi \cdot g \cdot d_{ш}^2} \cdot \sqrt{2g \cdot (300 - h_{ш})} = 3,54 \cdot \bar{a} \cdot \sqrt{300 - h_{ш}}; \quad (2)$$

$\bar{a}$ – относительное открытие затвора, м;

π – постоянная величина, $\pi = 3,14$;

g – ускорение силы тяжести, $g = 9,81$ м/с²;

$d_{ш}$ – диаметр шахты, м;

κ – кривизна поверхности потока в сжатом сечении;

Q – расход водосброса, м³/с:

$$Q \approx 0,8 \cdot 2 \cdot a \cdot b \cdot \bar{a} \cdot \sqrt{2g \cdot 146} = 2055 \cdot \bar{a}; \quad (3)$$

a – высота открытия затвора, м;

b – расстояние от верха сжатого сечения до кромки затвора, м;

V_c – скорость в сжатом сечении за затвором, м/с:

$$V_c \approx 0,8 \cdot \sqrt{2g \cdot (300 - h_{ш})}. \quad (4)$$

Также в процессе проведения лабораторных исследований на модели водосброса необходимо определить допустимые величины вакуумов, которые можно определить по зависимости [11–14]:

$$\frac{p_{\text{вак}}}{p \cdot g} = 10,33 - \frac{\nabla z}{900} - \frac{p_{\text{бар}}}{p \cdot g} - \frac{p_{\text{нас}}}{p \cdot g}, \quad (5)$$

где $p_{\text{вак}}$ – величина максимального вакуума в шахте, мбар;

p – плотность воды, кг/м³ [15, 16];

10,33 – нормальное атмосферное давление на уровне моря, м вод. ст.;

∇z – абсолютная отметка местоположения сооружения, м;

$\frac{\nabla z}{900}$ – поправка на превышение данной точки над уровнем моря, м;

$\frac{p_{\text{бар}}}{p \cdot g} \approx 0,39$ м – поправка на максимальное барическое давление за счет

метеорологических факторов;

$p_{\text{нас}}$ – давление насыщающих водяных паров при холодном закипании воды, м вод. ст.

Выводы. Затворная камера с двумя затворами позволяет регулировать поочередное открытие левого или правого затвора с подачей воздуха и без подачи воздуха, а также и открытие сразу двух затворов. Это даст возможность увидеть максимальное количество картин движения воды в шахте и туннеле. На основании увиденного процесса движения воды можно проанализировать работу модели вакуумного шахтного водосброса.

Например, при двух открытых затворах на 0,5 м от полного открытия и впуске воздуха в шахту можно видеть, что работа всего водопропускного тракта удовлетворительная. Также при чередовании открытия левого или правого затворов на 0,5 м от полного открытия и впуске воздуха в шахту картина движения воды удовлетворительная.

Вначале на модели предполагалось использовать затворы с острой кромкой. На предварительных исследованиях работы шахтного гасителя энергии с использованием затворов с острой кромкой при обтекании напорного ребра затвора за счет искривления поверхности струи происхо-

дит ее отклонение от вертикального направления падения. В результате происходит контакт струи с внутренней поверхностью шахты, что нежелательно для бетона, даже несмотря на сильную аэрацию потока. В целях снижения отклонения струи регулирующим граням затвора, принято использовать скругленные затворы.

На основании экспериментальных данных на модели шахтного водосброса Рогунской ГЭС можно оценить ее принципиальную работу, а именно:

- эффективность гашения энергии потока;
- диапазон расходов, в котором возможно использование конструкции;
- допустимые характеристики вакуума.

Список источников

1. Швайнштейн А. М. Строительные туннели. Гидравлические условия работы. М.: Энергоатомиздат, 1986. 125 с.
2. Золотов Л. А., Семенов В. М. Тенденции в проектировании гидротехнических водосбросных сооружений с учетом кавитации и динамических нагрузок // Гидротехническое строительство. 1985. № 7. С. 4–9.
3. Швайнштейн А. М. Совмещенные туннельные водопропускные сооружения / СПб.: Изд-во ВНИИГ, 1993(1994). 79 с. ISBN 5-85529-013-1.
4. Животовский Б. А., Пономарев Н. К. Совершенствование гидравлического расчета шахтного вихревого водосброса // Интернет-журнал Науковедение, 2015. Т. 7, № 1(26). С. 65–81. DOI: 10.15862/121TVN115. EDN: UBGSEF.
5. Применение вакуумной водоприемной воронки шахтного водосброса / Э. С. Беглярова, А. П. Гурьев, А. В. Дмитриева, С. А. Соколова // Доклады ТСХА: сб. ст. Вып. 287. Том II, часть I. М.: Грин Эра 2: Сам полиграфист, 2015. С. 351–353. EDN: EKXASV.
6. Физическая энциклопедия. Т. 1: Аароново – Длинные / гл. ред. А. М. Прохоров. М.: Советская энциклопедия, 1988. 704 с. ISBN 5-85270-061-4.
7. Теоретическое обоснование работы вакуумного шахтного гасителя энергии потока / А. П. Гурьев, Д. В. Козлов, Н. В. Ханов, Д. А. Алексеев // Гидротехническое строительство. 2024. № 5. С. 24–33. DOI: 10.34831/EP.2024.36.58.004. EDN: GJYMKJ.
8. Теоретическое обоснование работы вакуумного шахтного гасителя энергии потока воды / А. П. Гурьев, Д. В. Козлов, Н. В. Ханов, Д. А. Алексеев // Современные проблемы гидравлики и гидротехнического строительства: сб. тез. докл. VI Всероссийского науч.-практ. семинара, Москва, 24 мая 2023 г. М.: Издательство МИСИ-МГСУ, 2023. С. 120–121. EDN: DZSDPR.
9. Расчет пропускной способности водосбросов: свидетельство о гос. регистрации программы для ЭВМ № 2023669686. / Аринжанов А. Е., Сарайкин А. И.; правообладатель ФБОУ ВО «Оренбургский государственный университет». Заявка № 2023668897: заявл. 14.09.2023; опублик. 19.09.2023, Бюл. № 9. EDN: LQDAWI.
10. Орехов, Г. В. Расчетное обоснование гасителей энергии высоконапорных водосбросов гидротехнических сооружений // Промышленное и гражданское строительство. 2020. № 9. С. 65–72. DOI 10.33622/0869-7019.2020.09.65-72. EDN: VGOYZI.

11. Расчет параметров гасителя энергии водного потока ЦНИИС для обеспечения сохранности косогорной водопропускной трубы / В. А. Подвербный, О. В. Подвербная, Г. А. Дорофеева, М. С. Степанов // Развитие инфраструктуры и логистических технологий в транспортных системах (рилттранс-2019): сб. тр., Санкт-Петербург, 23–25 окт. 2019 г. Ч. 1. СПб: Петербургский государственный университет путей сообщения им. Императора Александра I, 2020. С. 338–347. EDN: XEDQXB.

12. Гидравлические исследования эффективности водобойных устройств за шахтным водосбросом по рассеиванию водной энергии – гидроузла 16 Тишрин в САР / Е. С. Алсадек, Н. В. Ханов, Д. В. Козлов, Х. Алали // Гидротехническое строительство. 2024. № 12. С. 18–22. DOI: 10.71917/EP.2024.50.32.004. EDN: JGDGAS.

13. Пат. 2803527 Российская Федерация, МПК G01L 21/12. Способ снижения погрешности измерения вакуума манометрическим преобразователем сопротивления / Ба-зылев В. К., Коротченко В. А., Скворцов В. Э., Родич А. Н.; заявитель Общество с ограниченной ответственностью «Максима». № 2022126779: заявл. 14.10.2022: опубл. 14.09.2023. EDN: HEYKUU.

14. Лунев Н. А. Характеристика потока и особенности кавитационных явлений в контрвихерных гасителях энергии гидротехнических сооружений // Научный Лидер. 2022. № 48(93). С. 176–179. EDN: WPWESW.

15. Лю Х., Федоров В. Численное моделирование шахты со спиральным лотком // Инженерные системы и городское хозяйство: мат. Национальной (всероссийской) науч.-практ. конф., Санкт-Петербург, 20–24 марта 2023 г. СПб.: Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, 2023. С. 45–49. EDN: QIBICG.

16. Бучнев И. Д. Результаты гидравлических исследований вертикальных вихре-вых водосбросов // Известия Всероссийского научно-исследовательского института гидротехники им. Б. Е. Веденеева. 2025. Т. 315. С. 44–52. EDN: BNOVKQ.

References

1. Shvainshtein A.M., 1986. *Stroitel'nye tunneli. Gidravlicheskie usloviya raboty* [Construction Tunnels. Hydraulic Operating Conditions]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 125 p. (In Russian).

2. Zolotov L.A., Semenov V.M., 1985. *Tendentsii v proektirovanii gidrotekhnicheskikh vodosbrosnykh sooruzheniy s uchetom kavitatsii i dinamicheskikh nagruzok* [Trends in spillway designs with consideration of cavitation and dynamic loads]. *Gidrotekhnicheskoe stroitel'stvo* [Power Technology and Engineering], no. 7, pp. 4-9. (In Russian).

3. Shvainshtein A.M., 1993(1994). *Sovmeshchennye tunnel'nye vodopropusknye sooruzheniya* [Combined Tunnel Culverts]. St. Petersburg, VNIIG Publ., 79 p. ISBN 5-85529-013-1. (In Russian).

4. Zhivotovsky B.A., Ponomarev N.K., 2015. *Sovershenstvovanie gidravlicheskogo rascheta shakhtnogo vikhrevogo vodosbrosa* [Improving the hydraulic calculation of a shaft vortex spillway]. *Internet-zhurnal Naukovedenie* [Internet Journal Science Study], vol. 7, no. 1(26), pp. 65-81, DOI: 10.15862/121TVN115, EDN: UBGSEF. (In Russian).

5. Beglyarova E.S., Guryev A.P., Dmitrieva A.V., Sokolova S.A., 2015. *Primenenie vakuumnoy vodopriemnoy voronki shakhtnogo vodosbrosa* [Application of a vacuum water intake funnel of a shaft spillway]. *Doklady TSKHA: sb. st.* [Reports of the Timiryazev Agricultural Academy: Coll. Art.], iss. 287, vol. II, part I. Moscow, Green Era 2: Printer Himself Publ., pp. 351-353, EDN: EKXASV. (In Russian).

6. Prokhorov A.M., 1988. *Fizicheskaya entsiklopediya. T. 1: Aaronovo – Dlinnye*. [Physical Encyclopedia. vol. 1: Aaronovo – Long]. Moscow, Soviet Encyclopedia, 704 p., ISBN 5-85270-061-4. (In Russian).

7. Guryev A.P., Kozlov D.V., Khanov N.V., Alekseev D.A., 2024. *Teoreticheskoe obosnovanie raboty vakuumnogo shakhtnogo gasitelya energii potoka* [Theoretical justification of the operation of a vacuum shaft energy dissipator]. *Gidrotekhnicheskoe stroitel'stvo* [Power Technology and Engineering], no. 5. pp. 24-33, DOI: 10.34831/EP.2024.36.58.004, EDN: GJYMKJ. (In Russian).

8. Guryev A.P., Kozlov D.V., Khanov N.V., Alekseev D.A., 2023. *Teoreticheskoe obosnovanie raboty vakuumnogo shakhtnogo gasitelya energii potoka vody* [Theoretical justification of the operation of a vacuum shaft energy dissipator]. *Sovremennye problemy gidravliki i gidrotekhnicheskogo stroitel'stva: sb. tez. dokl. VI Vseros. nauch.-prakt. seminara* [Current Issues of Hydraulics and Hydraulic Engineering: Collect. of Papers from the VI All-Russian Scientific and Practical Seminar]. Moscow, MISI-MGSU Publ., pp. 120-121, EDN: DZSDPR. (In Russian).

9. Arinzhanov A.E., Saraikin A.I., 2023. *Raschet propusknoy sposobnosti vodosbrosov: svidetel'stvo o gos. registratsii programmy dlya EVM* [Calculation of the Spillway Capacity. Certificate of State Registration of Computer Program], no. 2023669686, EDN: LQDAWI. (In Russian).

10. Orekhov G.V., 2020. *Raschetnoe obosnovanie gasiteley energii vysokonapornykh vodosbrosov gidrotekhnicheskikh sooruzheniy* [Calculation justification of energy dissipators for high-pressure spillways of hydraulic structures]. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo* [Industrial and Civil Engineering], no. 9, pp. 65-72. DOI 10.33622/0869-7019.2020.09.65-72, EDN: VGOYZI. (In Russian).

11. Podverbny V.A., Podverbnyaya O.V., Dorofeeva G.A., Stepanov M.S., 2020. *Raschet parametrov gasitelya energii vodnogo potoka TSNIIS dlya obespecheniya sokhrannosti kosogornoy vodopropusknoy truby* [Calculation of the parameters of the TsNIIS water flow energy dissipator to ensure the safety of the slope culvert]. *Razvitie infrastruktury i logisticheskikh tekhnologiy v transportnykh sistemakh (rilttrans-2019): sb. tr* [Development of Infrastructure and Logistics Technologies in Transport Systems (Rilttrans-2019): Coll. papers], St. Petersburg, Emperor Alexander I Petersburg State University of Transport, pp. 338-347, EDN: XEDQXB. (In Russian).

12. Alsadek E.S., Khanov N.V., Kozlov D.V., Alali H., 2024. *Gidravlicheskie issledovaniya effektivnosti vodoboynykh ustroystv za shakhtnym vodosbrosom po rasseivaniyu vodnoy energii – gidrouzla 16 Tishrin v SAR* [Hydraulic studies of the efficiency of stilling devices behind a shaft spillway for water energy dissipation – 16 Tishrin waterworks in the SAR]. *Gidrotekhnicheskoe stroitel'stvo* [Power Technology and Engineering], no. 12, pp. 18-22, DOI: 10.71917/EP.2024.50.32.004, EDN: JGDGAS. (In Russian).

13. Bazylev V.K., Korotchenko V.A., Skvortsov V.E., Rodich A.N., 2022. *Sposob snizheniya pogreshnosti izmereniya vakuuma manometricheskim preobrazovatelem soprotivleniya* [Method for Reducing Error in Measuring Vacuum with Manometric Resistance Transducer]. Patent of the Russian Federation, no. 2803527, EDN: HEYKUU. (In Russian).

14. Lunev N.A., 2022. *Kharakteristika potoka i osobennosti kavitatsionnykh yavleniy v kontrvikhernykh gasitelyakh energii gidrotekhnicheskikh sooruzheniy* [Flow characteristics and peculiarities of cavitation phenomena in counter-vortex flow energy dissipators of hydraulic structures]. *Nauchnyy Lider* [Scientific Leader], no. 48(93), pp. 176-179, EDN: WPWESW. (In Russian).

15. Liu H., Fedorov V., 2023. *Chislennoe modelirovanie shakhty so spiral'nym lotkom* [Numerical simulation of a mine with a spiral chute]. *Inzhenernye sistemy i gorodskoe khozyaystvo: mat. Natsional'noy (vseros.) nauch.-prakt. konf* [Engineering Systems and Municipal Economy: Proceed. of the National (All-Russian) Scientific-Practical Conf.], St. Petersburg, St. Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering, pp. 45-49, EDN: QIBICG. (In Russian).

16. Buchnev I.D., 2025. *Rezultaty gidravlicheskih issledovaniy vertikal'nykh vikhrevykh vodosbrosov* [Results of hydraulic studies of vertical vortex spillways]. *Izvestiya Vse-rossiyskogo nauchno-issledovatel'skogo instituta gidrotekhniki im. B. Ye. Vedeneyeva* [Bulet. of the All-Russian Research Institute of Hydraulic Engineering named after B. E. Vedeneyev], vol. 315, pp. 44-52, EDN: BNOVKQ. (In Russian).

Информация об авторах

Д. А. Алексеев – ассистент кафедры гидротехнических сооружений, Российский аграрный университет – МСХА имени К. А. Тимирязева, Москва, Российская Федерация, daniil.alekseev@rgau-msha.ru, SPIN-код: 8085-3065, ORCID ID: 0009-0009-1890-3471;

Н. В. Ханов – заведующий кафедрой, доктор технических наук, профессор кафедры гидротехнических сооружений, Российский аграрный университет – МСХА имени К. А. Тимирязева, Москва, Российская Федерация, khanov@rgau-msha.ru, SPIN-код: 4314-8184, Web of Science ResearcherID: L-1087-2013, SCOPUS Author ID: 6603959022, AuthorID: 464889, ORCID ID: 0000-0002-5764-4734;

Л. С. Дейнеко – доцент кафедры гидротехнических сооружений, кандидат технических наук, Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К. А. Тимирязева, Москва, Российская Федерация, larissa-ser@yandex.ru, SPIN-код: 6185-6320, Web of science ResearcherID: LNR-3276-2024, SCOPUS Author ID: 57202378976, AuthorID: 1096746, ORCID ID: 0009-0000-3989-3350;

Т. Ю. Жукова – ассистент кафедры гидротехнических сооружений, Российский аграрный университет – МСХА имени К. А. Тимирязева, Москва, Российская Федерация, t.zhukova@rgau-msha.ru, ztu-12@mail.ru, SPIN-код: 5357-4597, AuthorID: 1111184, ORCID ID: 0000-0002-9654-3039;

А. А. Кадысева – доктор биологических наук, доцент кафедры сельскохозяйственного водоснабжения, водоотведения, насосов и насосных станций, Российский аграрный университет – МСХА имени К. А. Тимирязева, Москва, Российская Федерация, kadyseva@mail.ru, SPIN-код: 4485-7332, AuthorID: 698088, ORCID ID: 0000-0001-8703-5684.

Information about the authors

D. A. Alekseev – Assistant the Chair of Hydraulic Engineering Constructions, Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy, Moscow, Russian Federation, daniil.alekseev@rgau-msha.ru, SPIN-код: 8085-3065, ORCID ID: 0009-0009-1890-3471;

N. V. Khanov – Head of the Department, Doctor of Technical Sciences, Professor the Chair of Hydraulic Engineering Constructions, Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy, Moscow, Russian Federation, khanov@rgau-msha.ru, SPIN-код: 4314-8184, Web of Science ResearcherID: L-1087-2013, SCOPUS Author ID: 6603959022, AuthorID: 464889, ORCID ID: 0000-0002-5764-4734;

L. S. Deineko – Docent the Chair of Hydraulic Engineering Constructions, Candidate of Technical Sciences, Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy, Moscow, Russian Federation, larissa-ser@yandex.ru, SPIN-код: 6185-6320, Web of science ResearcherID: LNR-3276-2024, SCOPUS Author ID: 57202378976, AuthorID: 1096746, ORCID ID: 0009-0000-3989-3350;

T. Yu. Zhukova – Assistant the Chair of Hydraulic Engineering Constructions, Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy, Moscow, Russian Federation, t.zhukova@rgau-msha.ru, ztu-12@mail.ru, SPIN-код: 5357-4597, AuthorID: 1111184, ORCID ID: 0000-0002-9654-3039;

A. A. Kadyseva – Doctor of Biological Sciences, Associate Professor the Chair of Agricultural Water Supply, Water Disposal, Pumps and Pumping Stations, Russian Agrarian University – Moscow Agricultural Academy, Moscow, Russian Federation, kadyseva@mail.ru, SPIN-code: 4485-7332, AuthorID: 698088, ORCID ID: 0000-0001-8703-5684.

Пути повышения эффективности орошаемого земледелия. 2025. Т. 96, № 2. С. 155–170.
Ways of Increasing the Efficiency of Irrigated Agriculture. 2025. Vol. 96, no. 2. P. 155–170.

*Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.
Все авторы в равной степени несут ответственность за нарушения в сфере этики научных публикаций.*

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.

All authors are equally responsible for ethical violations in scientific publications.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare no conflicts of interests.

*Статья поступила в редакцию 19.05.2025; одобрена после рецензирования 10.07.2025;
принята к публикации 30.07.2025.*

*The article was submitted 19.05.2025; approved after reviewing 10.07.2025; accepted for
publication 30.07.2025.*