

ГИДРОТЕХНИЧЕСКОЕ СТРОИТЕЛЬСТВО, ГИДРАВЛИКА И ИНЖЕНЕРНАЯ ГИДРОЛОГИЯ

Научная статья

УДК 627.8:626.01:693.5

doi: 10.31774/2712-9357-2026-16-3-330-346

Лабораторные испытания моделей сталежелезобетонных напорных водоводов

Нартмир Владимирович Ханов¹, Сергей Евгеньевич Лисичкин²,
Николай Викторович Сермавбрин³, Наталья Борисовна Мартынова⁴,
Даниил Андреевич Алексеев⁵

^{1, 4, 5}Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К. А. Тимирязева,
Москва, Российская Федерация

²Филиал Проектно-изыскательского и научно-исследовательского института
«Гидропроект» имени С. Я. Жука – Научно-исследовательский институт
энергетических сооружений, Москва, Российская Федерация

³КАВКАЗ.РФ, Москва, Российская Федерация

¹nvkhanov@yahoo.com, <https://orcid.org/0000-0002-5764-4734>

²lisichkin1989@rambler.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2761-331X>

³n.sermavbrin@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0002-7217-2891>

⁴nmartinova@rgau-msha.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5282-5835>

⁵daniil.alekseev.1996@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0009-1890-3471>

Аннотация. Цель: проведение лабораторных испытаний моделей сталежелезобетонных напорных водоводов при действии внутреннего давления. **Материалы и методы.** Лабораторные испытания проводились на основе трех серий сталежелезобетонных моделей напорных водоводов, имеющих внутреннюю стальную оболочку толщиной 1–5 мм из Ст3 радиусом 271,5 мм (которая одновременно являлась наружной стенкой гидравлического кольцевого домкрата), внешнюю железобетонную оболочку из бетона проектной марки М-300 и кольцевой стержневой арматуры диаметром 12 мм класса А-П. Испытательная нагрузка прикладывалась ступенями по 10 % от разрушающей нагрузки (эксплуатационная нагрузка принималась равной $P = 2,8$ МПа). Опытные модели доводились до разрушения при достижении внутренней стальной оболочки и кольцевой арматурой внешней железобетонной оболочки пределов текучести. **Результаты.** Установлены предельные значения нагрузок (внутреннего давления), соответствующие разрушению опытных моделей. Получена картина трещинообразования во внешней железобетонной оболочке опытных моделей на этапах нагружения. Переменными параметрами являлись: толщина внутренней стальной оболочки и внешней железобетонной оболочки, площадь сечения кольцевой арматуры, расположение кольцевых армокаркасов относительно оси модели. **Выводы.** Выполненные экспериментальные исследования показали, что прочность бетона моделей изменялась в диапазоне 20,0–36,8 МПа, модуль упругости – в диапазоне 26500–33700 МПа, соотношение площадей кольцевой арматуры и стальной оболочки – в диапазоне 0,226–4,52. Определены значения разрушающих нагрузок в диапазоне $P = 4,8–7,6$ МПа, что объясняется различными параметрами прочностных элементов моделей. Установлено, что трещины на поверхности опытных моделей раскрываются менее интенсивно и более равномерно, это позволяет сделать вывод о необходимости обоснования радиуса ряда кольцевой арматуры.

Ключевые слова: сталежелезобетонные водоводы, внутренняя стальная оболочка, внешняя железобетонная оболочка, кольцевое армирование, характер трещинообразования

Источник финансирования: собственные средства.

Для цитирования: Лабораторные испытания моделей сталежелезобетонных напорных водоводов / Н. В. Ханов, С. Е. Лисичкин, Н. В. Сермавбрин, Н. Б. Мартынова, Д. А. Алексеев // Мелиорация и гидротехника. 2026. Т. 16, № 3. С. 330–346. <https://doi.org/10.31774/2712-9357-2026-16-3-330-346>.

HYDRAULIC ENGINEERING, HYDRAULICS AND ENGINEERING HYDROLOGY

Original article

Laboratory testing of steel-reinforced concrete pressure conduit models

Nartmir V. Khanov¹, Sergey E. Lisichkin², Nikolay V. Sermavbrin³,
Natalia B. Martynova⁴, Daniil A. Alekseev⁵

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

²Branch of Design, Survey and Research Institute Hydroproject named after S. Y. Zhuk – Research Institute of Energy Structures, Moscow, Russian Federation

³CAUCASUS.RF, Moscow, Russian Federation

¹nvkhanov@yahoo.com, <https://orcid.org/0000-0002-5764-4734>

²lisichkin1989@rambler.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2761-331X>

³n.sermavbrin@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0002-7217-2891>

⁴nmartynova@rgau-msha.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5282-5835>

⁵daniil.alekseev.1996@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0009-1890-3471>

Abstract. Purpose: to conduct laboratory tests of composite (steel-reinforced concrete) pressure conduit models under internal pressure. **Materials and methods.** Laboratory tests were conducted using three series of composite concrete pressure conduit models with an internal steel shell 1–5 mm thick made of St3 with a radius of 271.5 mm (which also served as the outer wall of the hydraulic ring jack), an external reinforced concrete shell made of M-300 design grade concrete and 12 mm diameter ring reinforcement of class A-II. The test load was applied in steps of 10 % of the breaking load (the service load was assumed to be $P = 2.8$ MPa). The test models were brought to failure when the inner steel shell and the ring reinforcement of the outer reinforced concrete shell reached the yield point. **Results.** The limit values of loads (internal pressure) corresponding to the test model failure were determined. A crack formation pattern in the outer reinforced concrete shell of experimental models at loading steps was obtained. The variable parameters were: the inner steel shell thickness and the outer reinforced concrete shell, the cross-sectional area of the hooped reinforcement, and the location of the hooped reinforcement relative to the model axis. **Conclusions.** The experimental studies showed that the model concrete strength varied in the range of 20.0–36.8 MPa, the elasticity modulus – in the range of 26,500–33,700 MPa, the ratio of the areas of the hooped reinforcement and the steel shell – in the range of 0.226–4.52. The values of destructive loads were determined in the range $P = 4.8$ –7.6 MPa, which is explained by the different parameters of the strength elements of the models. It was found that cracks on the surface of the experimental models open less intensely and more uniformly, which allows to conclude that it is necessary to justify the radius of the hooped reinforcement row.

Keywords: steel-reinforced concrete conduits, internal steel shell, external reinforced concrete shell, hooped reinforcement, crack formation pattern

Funding source: own funds.

For citation: Khanov N. V., Lisichkin S. E., Sermavbrin N. V., Martynova N. B., Alekseev D. A. Laboratory testing of steel-reinforced concrete pressure conduit models. *Land Reclamation and Hydraulic Engineering*. 2026;16(3):330–346. (In Russ.). <https://doi.org/10.31774/2712-9357-2026-16-3-330-346>.

Введение. Сталежелезобетонные водоводы являются одними из основных напорных сооружений ГЭС и ГАЭС [1–5]. Сталежелезобетонная конструкция напорных водоводов включает внутреннюю стальную оболочку и окружающую ее внешнюю железобетонную оболочку, которые работают совместно^{1, 2, 3} [6]. Для обоснования сталежелезобетонной конструкции напорного водовода ранее были проведены лабораторные испытания в целях оценки влияния различных параметров сталежелезобетонных напорных водоводов на их прочность и характер трещинообразования.

При этом большинство известных экспериментальных работ посвящено изучению конструкций с фиксированными геометрическими и арматурными параметрами [1, 3], тогда как влияние совместного варьирования толщины стальной оболочки, степени кольцевого армирования и положения арматурных каркасов на напряженно-деформированное состояние и трещиностойкость остается недостаточно систематизированным. В настоящем исследовании представлены результаты испытаний 10 модельных

¹Пат. на полез. модель 49846 Рос. Федерация, МПК Е 03 В 7/00, Е 02 В 9/06. Сталежелезобетонный турбинный напорный водовод / Беллендир Е. Н., Коних Г. С., Костыря Г. З.; заявитель и патентообладатель Всерос. науч.-исслед. ин-т гидротехники им. Б. Е. Веденеева. № 2005122889/22; заявл. 18.07.05; опубл. 10.12.05. 5 с. EDN: QJTORH.

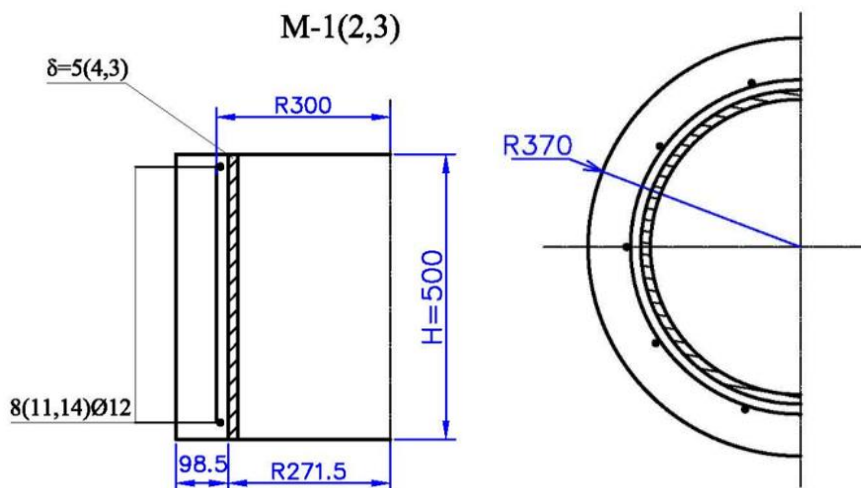
²Пат. 2272866 Рос. Федерация, МПК Е 02 В 9/06. Сталежелезобетонный турбинный напорный водовод / Судаков В. Б., Караваев А. В., Елифанов А. П., Ботвинов Б. Г.; заявитель и патентообладатель Инж. центр ЕЭС – Гидропроект, Ленгидропроект, Теплоэлектропроект, Фирма ОРГРЭС. № 2004125250/03; заявл. 19.08.04; опубл. 27.03.06, Бюл. № 9. 6 с. EDN: EZRP1Z.

³Пат. 2235826 Рос. Федерация, МПК Е 02 В 9/06. Сталежелезобетонный турбинный напорный водовод / Судаков В. Б., Караваев А. В., Ботвинов Б. Г.; заявитель и патентообладатель Всерос. науч.-исслед. ин-т гидротехники им. Б. Е. Веденеева. № 2003111080/03; заявл. 17.04.03; опубл. 10.09.04. 7 с. EDN: TEAJIN.

образцов, объединенных в три серии, которые охватывают широкий диапазон конструктивных решений: толщину внутренней стальной оболочки от 1 до 5 мм, площадь кольцевой арматуры от 8Ø12 до 20Ø12 А-II, а также различные варианты размещения армокаркасов – от внутренней грани до периферии железобетонной оболочки. Такой подход позволил не только определить предельные разрушающие нагрузки (в диапазоне 4,8–7,6 МПа), но и выявить закономерности образования и раскрытия трещин в зависимости от соотношения несущих элементов, что дает возможность обоснованно подходить к выбору рациональных параметров при проектировании сталежелезобетонных водоводов.

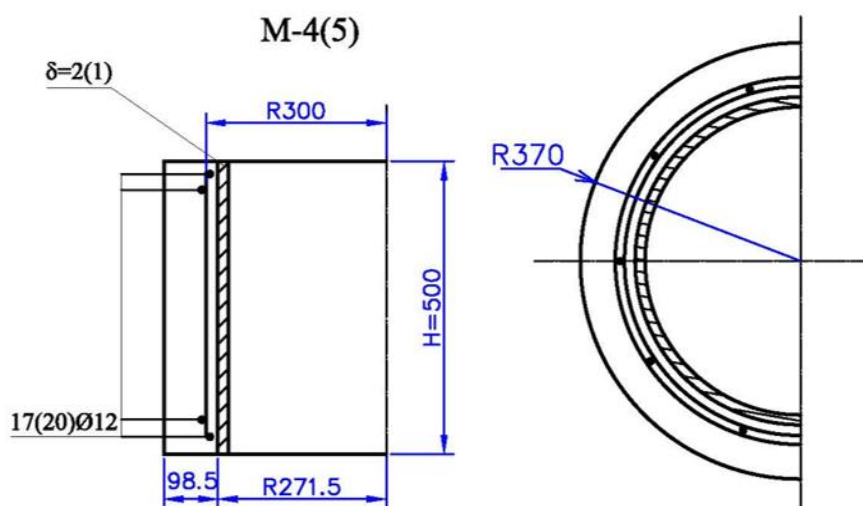
Материалы и методы исследований. Лабораторные испытания проводились на основе трех серий сталежелезобетонных моделей, которые были рассчитаны на действие одной и той же величины нагрузки. Переменными параметрами являлись: толщина внутренней стальной и внешней железобетонной оболочек, количество кольцевой стержневой арматуры, размещение кольцевых арматурных каркасов. Внутренняя стальная оболочка также выполняла функцию наружной стенки кольцевого гидравлического домкрата. При этом учитывался опыт проведения экспериментальных исследований напорных сталежелезобетонных конструкций [7–11].

Первая серия состояла из пяти моделей (В-1, В-2, В-3, В-4, В-5), имеющих различные соотношения площади сечения внутренней стальной оболочки и кольцевой арматуры (рисунки 1 и 2). Внутренний радиус железобетонной оболочки из Ст3 равен 271,5 мм, наружный радиус – 370 мм, толщина стенок лабораторных моделей сталежелезобетонного водовода – 98,5 мм. Каркас кольцевой арматуры класса А-II находился у внутренней грани железобетонной оболочки при радиусах 292,5–310 мм.



**Рисунок 1 – Лабораторные модели первой серии
В-1, В-2, В-3 (размеры в миллиметрах)**

**Figure 1 – Laboratory models of the first series
В-1, В-2, В-3 (dimensions in millimeters)**



**Рисунок 2 – Лабораторные модели первой серии
В-4, В-5 (размеры в миллиметрах)**

**Figure 2 – Laboratory models of the first series
В-4, В-5 (dimensions in millimeters)**

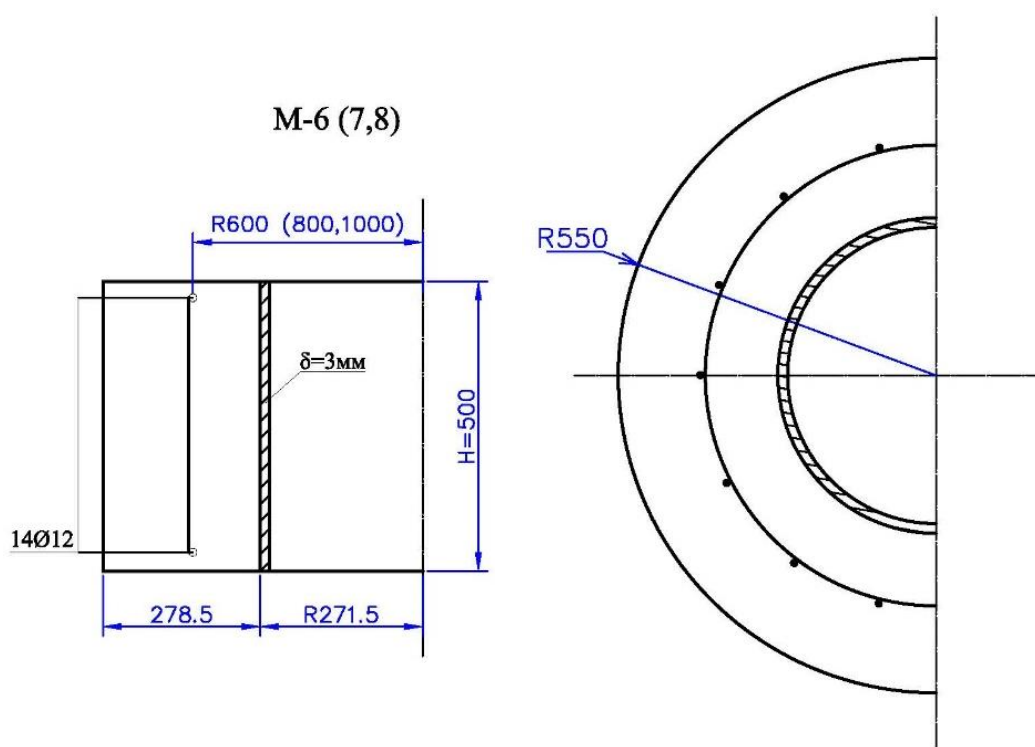
Модель В-1 включала внутреннюю стальную оболочку толщиной 5 мм, кольцевую арматуру в количестве 8Ø12 А-II (при соотношении площадей кольцевой арматуры и стальной оболочки 0,226), имела прочность бетона 36,8 МПа, модуль упругости 33700 МПа, процент армирования 1,84 %. Модель В-2 имела внутреннюю стальную оболочку толщиной 4 мм, кольцевую арматуру 11Ø12 А-II (при соотношении площадей коль-

цевой арматуры и стальной оболочки 0,622), прочность бетона 33,4 МПа, модуль упругости 32500 МПа, процент армирования 2,53 %. Модель В-3 имела внутреннюю стальную оболочку толщиной 3 мм, кольцевую арматуру 14Ø12 А-II (при соотношении площадей кольцевой арматуры и стальной оболочки 1,055), прочность бетона 36,8 МПа, модуль упругости 33700 МПа, процент армирования 3,22 %. Модель В-4 имела внутреннюю стальную оболочку толщиной 2 мм, кольцевую арматуру 17Ø12 А-II (при соотношении площадей кольцевой арматуры и стальной оболочки 1,921), прочность бетона 33,4 МПа, модуль упругости 32500 МПа, процент армирования 3,92 %. Модель В-5 имела внутреннюю стальную оболочку толщиной 1 мм, кольцевую арматуру 20Ø12 А-II (при соотношении площадей кольцевой арматуры и стальной оболочки 4,52), прочность бетона 33,4 МПа, модуль упругости 32500 МПа, процент армирования 4,62 %.

Вторая серия состояла из трех моделей (В-6, В-7, В-8), имеющих постоянное соотношение площади сечения кольцевой арматуры и внутренней стальной оболочки (1,055) и различную удаленность кольцевого арматурного каркаса от внутренней стальной оболочки (рисунок 3). При этом за счет большей толщины железобетонной части конструкции (278,5 мм по сравнению с 98,5 мм) процент кольцевого армирования ниже (1,14 %). Внутренний радиус равнялся 271,5 мм, внешний радиус – 550 мм. Радиус кольцевого армокаркаса в модели В-6 составлял 300 мм, в модели В-7 – 400 мм, в модели В-8 – 500 мм. Прочность бетона В-6 34,8 МПа, модуль упругости 33000 МПа; прочность бетона В-7 34,8 МПа, модуль упругости 33000 МПа; прочность бетона В-8 36,8 МПа, модуль упругости 33700 МПа.

Третья серия состояла из двух моделей (В-9, В-10), имеющих так называемое периферийное кольцевое армирование, при котором кольцевой арматурный каркас располагался близко к внешней поверхности модели (рисунок 4). Внутренний радиус равнялся 271,5 мм, внешний радиус – 370 мм, толщина стенки моделей – 98,5 мм (как в первой серии). Модель

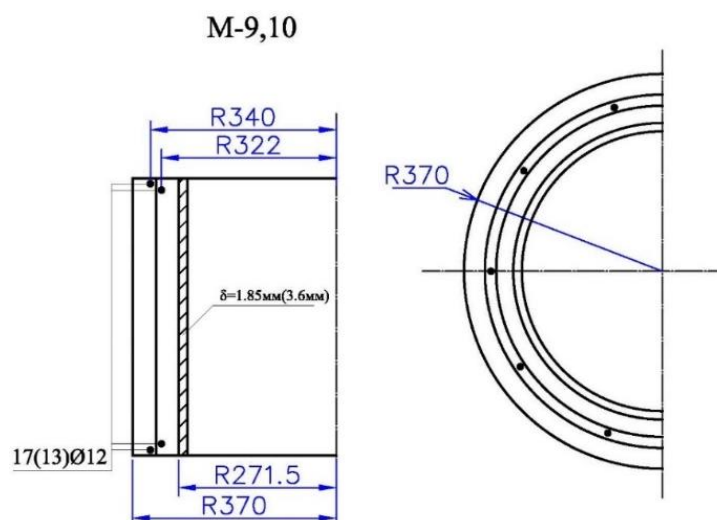
В-9 имела внутреннюю стальную оболочку толщиной 1,85 мм; модель В-10 – 3,6 мм. Модель В-9 имела кольцевую арматуру 17Ø12 А-II (при соотношении площадей кольцевой арматуры и стальной оболочки 2,077), процент армирования 3,92 %; В-10 – 13Ø12 А-II (при соотношении площадей кольцевой арматуры и стальной оболочки 0,816), процент армирования 2,93 %. Защитный слой бетона составлял 25 мм от торцевой поверхности опытных моделей; в моделях В-9 и В-10 – 30 мм со стороны цилиндрической поверхности. Прочность бетона моделей В-9 и В-10 20,0 МПа, модуль упругости 26500 МПа.



**Рисунок 3 – Лабораторные модели второй серии
В-6, В-7, В-8 (размеры в миллиметрах)**

**Figure 3 – Laboratory models of the second series
В-6, В-7, В-8 (dimensions in millimeters)**

Лабораторные модели изготавливались из бетона проектной марки М-300. Максимальная крупность заполнителя 20 мм. Бетонная смесь укладывалась слоями по 20–25 см и прорабатывалась глубинными вибраторами с конической насадкой.



**Рисунок 4 – Лабораторные модели третьей
серии В-9, В-10 (размеры в миллиметрах)**
**Figure 4 – Laboratory models of the third series
В-9, В-10 (dimensions in millimeters)**

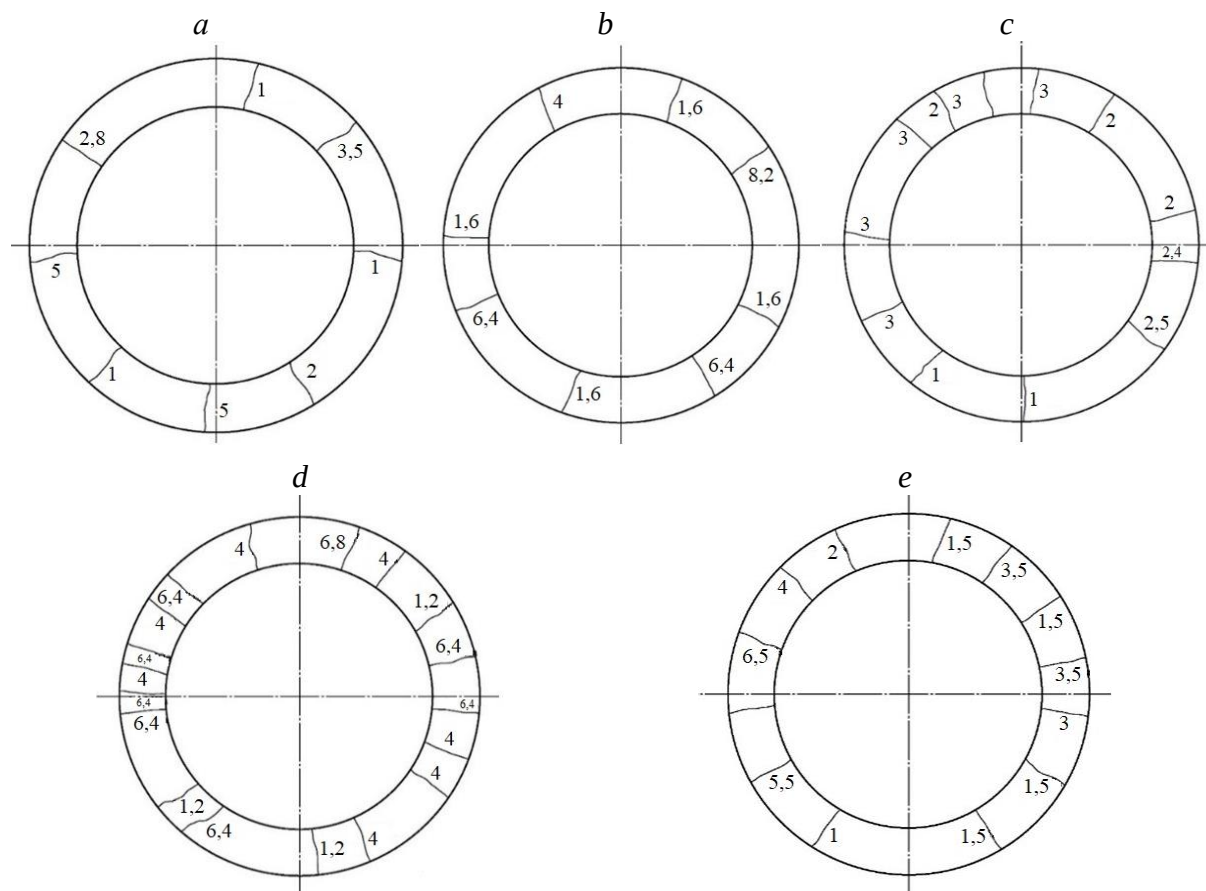
Расчетные характеристики бетона проверялись на контрольных бетонных кубиках $15 \times 15 \times 15$ см.

При проведении лабораторных испытаний к опытным моделям посредством кольцевого гидродомкрата прикладывалось внутреннее давление ступенями, составляющими 10 % от предполагаемой разрушающей нагрузки. При этом эксплуатационная нагрузка принималась равной $P = 2,8$ МПа. Полное разрушение лабораторных моделей соответствовало достижению пределов текучести внутренней стальной оболочки и кольцевой арматурой.

Для контроля напряженно-деформированного состояния лабораторные сталежелезобетонные модели оснащались контрольно-измерительной аппаратурой (деформации арматуры и стальной оболочки измерялись тензорезисторами, ширина раскрытия трещин измерялась индикаторами часового типа МИГ-1 и микроскопом отсчетным МПБ-2).

Результаты и обсуждение. В ходе лабораторных испытаний были получены данные о прочности опытных моделей и характере трещинообразования.

Модели первой серии В-1, В-2, В-3, В-4, В-5 (рисунок 5).



a – модель В-1; *b* – модель В-2; *c* – модель В-3; *d* – модель В-4; *e* – модель В-5
a – model B-1; *b* – model B-2; *c* – model B-3; *d* – model B-4; *e* – model B-5

Рисунок 5 – Распределение трещин в моделях первой серии (давление при образовании трещин, МПа)
Figure 5 – Distribution of cracks in the first series of models (pressure at crack formation, MPa)

Модель В-1. Появление трещин в бетоне внешней оболочки модели В-1 отмечалось при нагрузке $P = 1,0$ МПа. При этом возникли три трещины под углом 120° друг к другу (рисунок 5а). Максимальная ширина их раскрытия равнялась $a_{cr} = 0,196$ мм на внешней поверхности.

Две последние трещины появились при нагрузке $P = 5,0$ МПа. Максимальная нагрузка для модели В-1 составила $P = 5,5$ МПа.

Модель В-2. При нагрузке $P = 1,6$ МПа образовались четыре трещины под углом 90° друг к другу (см. рисунок 5b) с максимальной шириной раскрытия $a_{cr} = 0,08$ мм на боковой поверхности модели.

Две последние трещины возникли при нагрузке $P = 6,4$ МПа. Максимальная нагрузка для модели В-2 составила $P = 6,8$ МПа.

Модель В-3. Первая трещина возникла при нагрузке $P = 1,0$ МПа (см. рисунок 5с). Последующие три трещины шириной раскрытия $a_{cr} = 0,27$ мм образовались на боковой цилиндрической поверхности при нагрузке $P = 2,0$ МПа. Максимальная нагрузка для модели В-3 составила $P = 7,5$ МПа.

Модель В-4. Появление первых трех трещин в бетоне внешней оболочки модели В-4 с максимальной шириной раскрытия $a_{cr} = 0,12$ мм было зафиксировано при нагрузке $P = 1,2$ МПа (см. рисунок 5d). Максимальная нагрузка для модели В-4 составила $P = 6,4$ МПа. При этом ширина раскрытия первой трещины возросла до $a_{cr} = 0,92$ мм, образовались новые трещины с шагом 6–10 см.

Модель В-5. При нагрузке $P = 1,2$ МПа возникла одиночная трещина с шириной раскрытия $a_{cr} = 0,08$ мм (см. рисунок 5e). Максимальная нагрузка для модели В-5 составила $P = 6,0$ МПа.

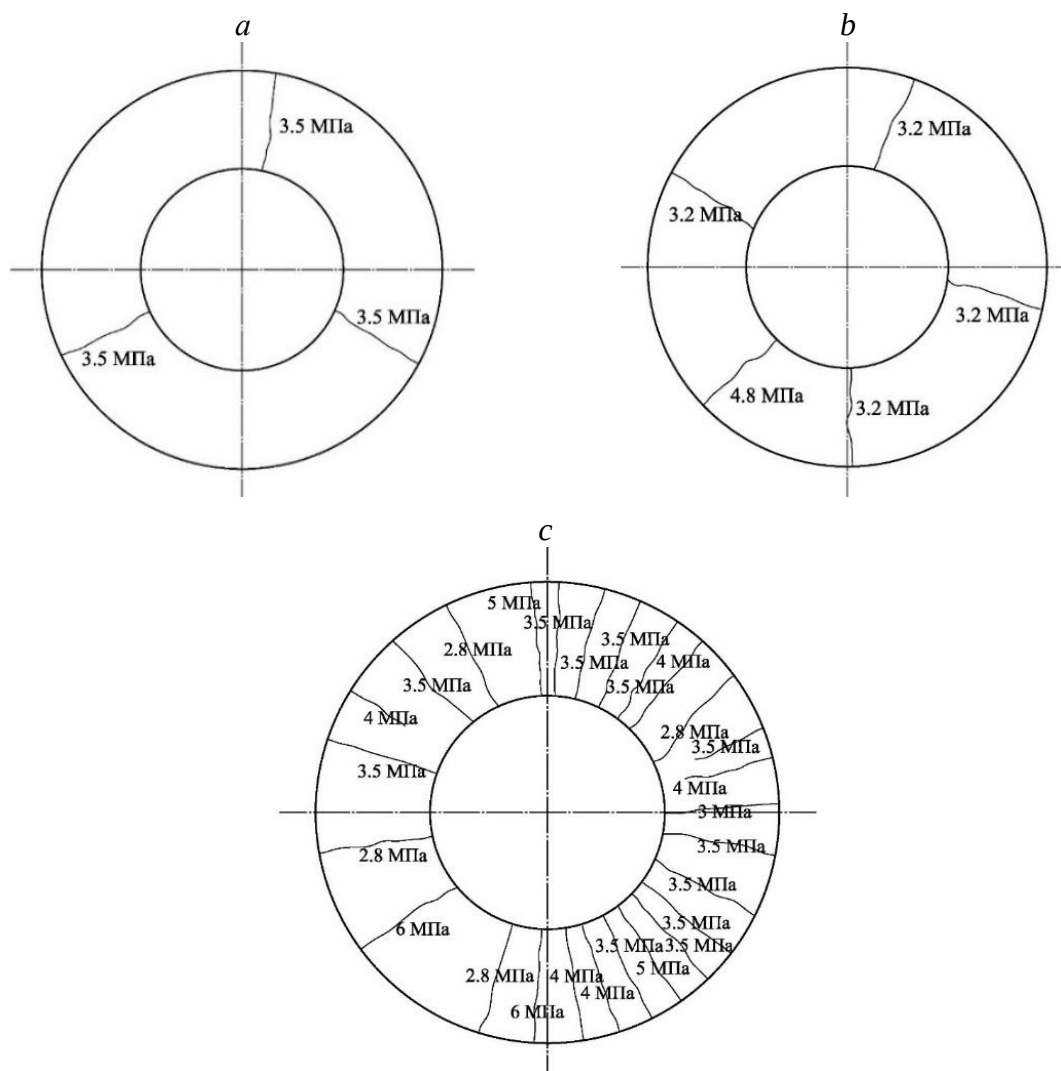
Модели второй серии В-6, В-7, В-8 (рисунок 6).

Модель В-6. При нагрузке $P = 1,5$ МПа были зафиксированы трещины под углом 120° друг к другу с максимальной шириной раскрытия $a_{cr} = 0,025$ мм (рисунок 6a). При этом ширина раскрытия трещин на боковой поверхности модели оказалась больше, чем на уровне кольцевого армокаркаса. Максимальная нагрузка для модели В-6 составила $P = 6,0$ МПа.

Модель В-7. При нагрузке $P = 3,2$ МПа появились четыре трещины с максимальной шириной раскрытия $a_{cr} = 0,38$ мм (см. рисунок 6b). Максимальная нагрузка для модели В-7 составила $P = 4,8$ МПа.

Модель В-8. При нагрузке $P = 2,8$ МПа (принятой в качестве эксплуатационной) были зафиксированы четыре трещины с максимальной шириной раскрытия $a_{cr} = 0,10$ мм (см. рисунок 6с). Текучесть в стальной обо-

лочке была зафиксирована при давлении $P = 5,5$ МПа. Максимальная нагрузка для модели В-8 составила $P = 7,6$ МПа.

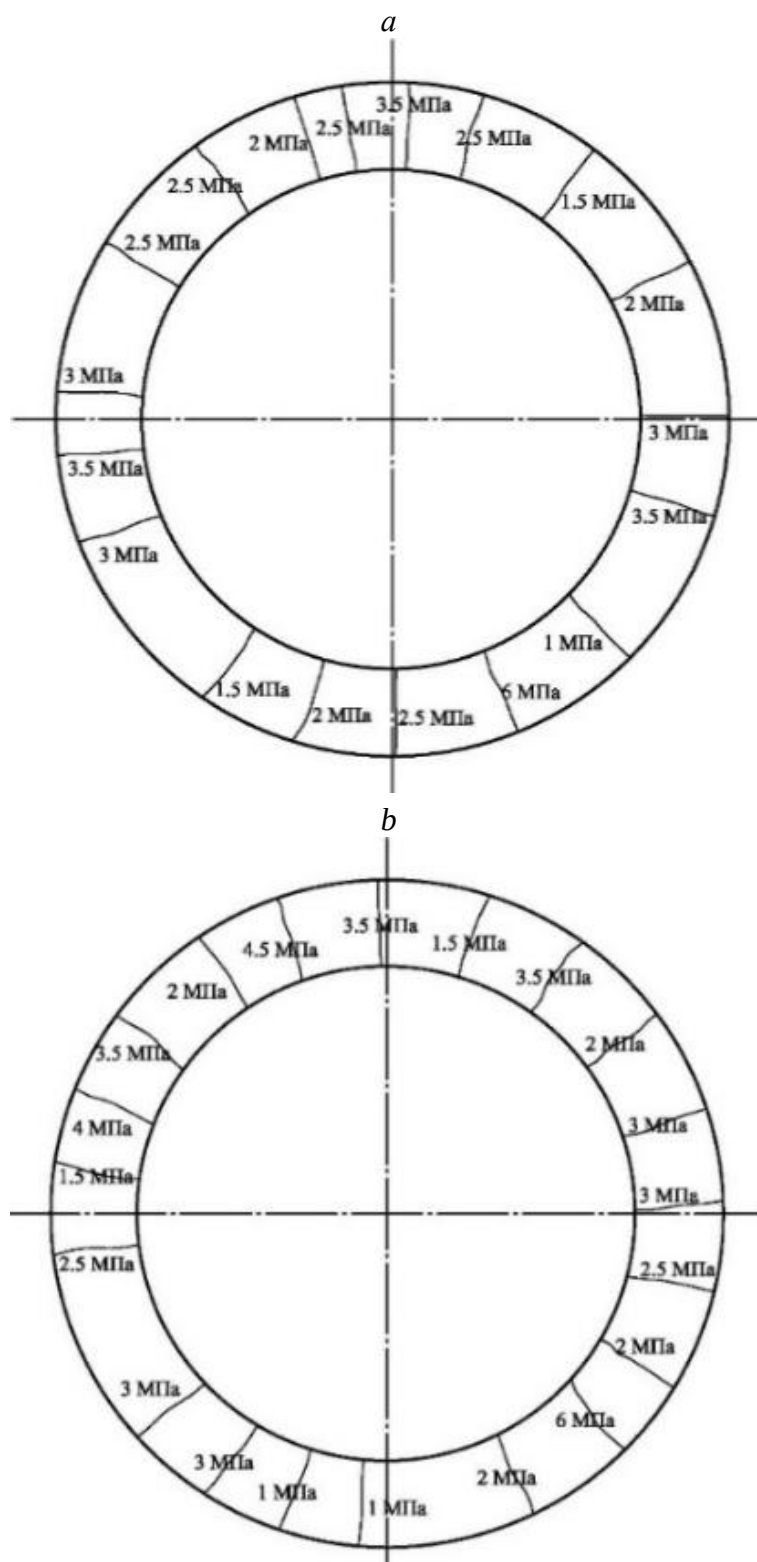


a – модель В-6; b – модель В-7; c – модель В-8
 a – model B-6; b – model B-7; c – model B-8

Рисунок 6 – Распределение трещин в моделях второй серии (давление при образовании трещин, МПа)
Figure 6 – Distribution of cracks in the second series of models (pressure during crack formation, MPa)

Модели третьей серии В-9, В-10 (рисунок 7).

Модель В-9. При нагрузке $P = 1,0$ МПа появились две трещины (рисунок 7а). Текучесть в стальной оболочке была зафиксирована при нагрузке $P = 5,5$ МПа. Максимальная нагрузка для модели В-9 составила $P = 7,5$ МПа.



a – модель В-9; *b* – модель В-10

a – model B-9; *b* – model B-10

**Рисунок 7 – Трещины в моделях третьей серии
(давление при образовании трещин, МПа)**

**Figure 7 – Cracks in the third series of models
(pressure during crack formation, MPa)**

Модель В-10. Картина трещинообразования в модели В-10 представлена на рисунке 7b. Значения ширины раскрытия трещин близки к значениям для модели В-9. Максимальная нагрузка для модели В-10 составила $P = 7,2$ МПа.

Выводы

1 Экспериментальные исследования были проведены на основе трех серий сталежелезобетонных моделей с толщиной внутренней стальной оболочки 1–5 мм и кольцевым армированием 8Ø12–20Ø12 А-II при варьировании следующими параметрами: толщиной внутренней стальной и внешней железобетонной оболочки, количеством кольцевой арматуры, расположением кольцевых армокаркасов относительно оси модели.

Прочность бетона моделей изменялась в диапазоне 20,0–36,8 МПа, модуль упругости – в диапазоне 26500–33700 МПа, соотношение площадей кольцевой арматуры и стальной оболочки – в диапазоне 0,226–4,52.

В результате экспериментальных исследований получены значения разрушающих нагрузок в диапазоне $P = 4,8–7,6$ МПа, что объясняется различными параметрами прочностных элементов моделей (внутренней стальной оболочки и кольцевой арматуры железобетонной оболочки).

2 Определен характер образования трещин в железобетонной части опытных моделей. Во внешней железобетонной оболочке моделей появились радиальные трещины, шаг и ширина раскрытия которых зависят от параметров моделей. Максимальная ширина раскрытия трещин составила $a_{cr} = 0,92$ мм (модель В-4 при нагрузке $P = 6,4$ МПа).

3 При толщине внутренней стальной оболочки 3–4 мм получено близкое совпадение экспериментальных и теоретических значений разрушающих нагрузок, определенных исходя из фактических пределов текучести внутренней стальной оболочки и кольцевой арматуры внешней железобетонной оболочки. Для моделей с более тонкой внутренней стальной оболочкой (1–3 мм) получено снижение разрушающих нагрузок.

4 С ростом процента кольцевого армирования внешней железобетонной оболочки количество трещин увеличивалось, что не противоречило классическим положениям теории железобетона.

5 При приближении ряда кольцевой арматуры к внешней поверхности опытных моделей, т. е. с уменьшением защитного слоя бетона, трещины на поверхности опытных моделей раскрываются менее интенсивно и более равномерно, что позволяет сделать вывод о необходимости обоснования радиуса ряда кольцевой арматуры.

Список источников

1. Гидроаккумулирующие электростанции. Строительство и эксплуатация Загорской ГАЭС / Н. И. Серебряников, В. Г. Родионов, А. П. Кулешов, В. И. Магрук, В. С. Иванущенко. М.: Изд-во НЦ ЭНАС, 2000. 355 с.
2. Синюгин В. Ю., Магрук В. И., Родионов В. Г. Гидроаккумулирующие электростанции в современной электроэнергетике: монография. М.: ЭНАС, 2008. 352 с. EDN: SUPSDZ.
3. Peculiarities of Zagorsk pumped-storage plant impact on water system / I. Dmitrieva, T. Gourievitch, O. Rubin, A. Zhircevic // Proceedings International Conference on European River Development, 16–18 Apr. Budapest, 1998. P. 353–360.
4. Расчетные исследования напорных водоводов и спиральных камер высоконапорных ГЭС / С. Е. Лисичкин, Г. Л. Козинец, А. В. Ивонтьев, Д. И. Пономарев, С. В. Богаченко, А. С. Лисичкин // Известия Всероссийского научно-исследовательского института гидротехники им. Б. Е. Веденеева. 2011. Т. 264. С. 110–118. EDN: ONUOFN.
5. Козинец Г. Л. Алгоритм расчета сталежелезобетонных водоводов // Инженерно-строительный журнал. 2011. № 6(24). С. 41–49. EDN: OGZOYL.
6. Компенсационные участки сталежелезобетонных напорных водоводов / Н. В. Ханов, Н. В. Сермавбрин, А. А. Кадысева, Н. Б. Мартынова // Природообустройство. 2025. № 4. С. 89–94. DOI: 10.26897/1997-6011-2025-4-89-94. EDN: BVDNQX.
7. Вайнберг А. И., Рыжиков К. О. Напряженное состояние высоконапорных сталежелезобетонных водоводов // Известия Всероссийского научно-исследовательского института гидротехники им. Б. Е. Веденеева. 2014. Т. 271. С. 109–119. EDN: SASCSN.
8. Numerical investigation of the mechanical behavior of segmental tunnel linings reinforced by a steel plate – Concrete composite structure / X. Liu, Y. Liu, Z. Jiang, J. Wang, H. A. Mang // Engineering Structures. 2023. Vol. 276. P. 115350. DOI: 10.1016/j.engstruct.2022.115350. EDN: MNXDBJ.
9. Sharma R. Material selection for penstocks in hydropower plants using a multi-criteria decision-making approach // Journal on Materials and Its Characterization. 2026. Vol. 3(2). P. 30–37. DOI: 10.46632/jmc/3/2/4. EDN: HDUEXQ.
10. Рубин О. Д., Алмасри А., Чжан Ц. Результаты исследований железобетонных конструкций напорных зданий ГАЭС и русловых зданий ГЭС // Гидротехническое строительство. 2024. № 11. С. 33–38. DOI: 10.71917/EP.2024.80.14.007. EDN: PKMDST.
11. Кузнецова Ю. А., Сидельников В. В. Оценка напряженного состояния бетонной плотины высоконапорного гидроузла с применением программного комплекса MIDAS FEA NX // Актуальные вопросы архитектуры и строительства: материалы

XVII Междунар. науч.-техн. конф., г. Новосибирск, 23–25 апр. 2024 г. Новосибирск: НГАСУ (Сибстрин), 2024. С. 134–139. EDN: CMDRNG.

References

1. Serebryanikov N.I., Rodionov V.G., Kuleshov A.P., Magruk V.I., Ivanushchenko V.S., 2000. *Gidroakkumuliruyushchie elektrostantsii. Stroitel'stvo i ekspluatatsiya Zagorskoy GAES* [Pumped-Storage Power Plants. Construction and Operation of the Zagorskaya Pumped-Storage Power Plant]. Moscow, Scientific Center ENAS Publ., 355 p. (In Russian).
2. Sinyugin V.Yu., Magruk V.I., Rodionov V.G., 2008. *Gidroakkumuliruyushchie elektrostantsii v sovremennoi elektroenergetike: monografiya* [Hydro Accumulating Electric Plants in Modern Electric Power Engineering: monograph]. Moscow, ENAS Publ., 352 p., EDN: SUPSDZ. (In Russian).
3. Dmitrieva I., Gourievitch T., Rubin O., Zhirceovich A., 1998. Peculiarities of Zagorsk pumped-storage plant impact on water system. Proceedings International Conference on European River Development. Budapest, pp. 353-360.
4. Lisichkin S.E., Kozinets G.L., Ivontyev A.V., Ponomarev D.I., Bogachenko S.V., Lisichkin A.S., 2011. *Raschetnye issledovaniya napornykh vodovodov i spiral'nykh kamer vysokonapornykh GES* [Calculation researches of head water conduits and spiral cases of high head HPP]. *Izvestiya Vserossiyskogo nauchno-issledovatel'skogo instituta gidrotekhniki im. B. Ye. Vedeneeva* [Bulletin of the All-Russian Research Institute of Hydraulic Engineering named after B. E. Vedeneyev], vol. 264, pp. 110-118, EDN: ONUOFN. (In Russian).
5. Kozinets G.L., 2011. *Algoritm rascheta stalezhelezobetonnykh vodovodov* [Calculation algorithm of steel-reinforced concrete water passages]. *Inzhenerno-stroitel'nyy zhurnal* [Journal of Civil Engineering], no. 6(24), pp. 41-49, EDN: OGZOYL. (In Russian).
6. Khanov N.V., Sermavbrin N.V., Kadyseva A.A., Martynova N.B., 2025. *Kompensatsionnye uchastki stalezhelezobetonnykh napornykh vodovodov* [Compensation sections of steel-reinforced concrete pressure water conduits]. *Prirodoobustroystvo* [Environmental Engineering], no. 4, pp. 89-94, DOI: 10.26897/1997-6011-2025-4-89-94, EDN: BVDNQX. (In Russian).
7. Weinberg A.I., Ryzhikov K.O., 2014. *Napryazhennoe sostoyanie vysokonapornykh stalezhelezobetonnykh vodovodov* [Stress state of high-pressure steel-reinforced concrete conduits]. *Izvestiya Vserossiyskogo nauchno-issledovatel'skogo instituta gidrotekhniki im. B. Ye. Vedeneeva* [Bulletin of the All-Russian Research Institute of Hydraulic Engineering named after B. E. Vedeneyev], vol. 271, pp. 109-119, EDN: SASCSN. (In Russian).
8. Liu X., Liu Y., Jiang Z., Wang J., Mang H.A., 2023. Numerical investigation of the mechanical behavior of segmental tunnel linings reinforced by a steel plate – Concrete composite structure. *Engineering Structures*, vol. 276, p. 115350, DOI: 10.1016/j.engstruct.2022.115350, EDN: MNXDBJ.
9. Sharma R., 2026. Material selection for penstocks in hydropower plants using a multi-criteria decision-making approach. *Journal on Materials and Its Characterization*, vol. 3(2), pp. 30-37, DOI: 10.46632/jmc/3/2/4, EDN: HDUEXQ.
10. Rubin O.D., Almasri A., Zhang Q., 2024. *Rezultaty issledovaniy zhelezobetonnykh konstruksiy napornykh zdaniy GAES i usloviy zdaniy GES* [The results of research on reinforced concrete structures of pressure buildings of the PSPP and riverbed buildings of the HPP]. *Gidrotekhnicheskoe stroitel'stvo* [Power Technology and Engineering], no. 11, pp. 33-38, DOI: 10.71917/EP.2024.80.14.007, EDN: PKMDST. (In Russian).
11. Kuznetsova Yu.A., Sidelnikov V.V., 2024. *Otsenka napryazhennogo sostoyaniya betonnoy plotiny vysokonapornogo gidrouzla s primeneniem programmnogo kompleksa MIDAS FEA NX* [Assessment of the stressed state of a concrete dam of a high-pressure hydroelectric power station using the MIDAS FEA NX software package]. *Aktualnye voprosy arkhitektury i*

stroitelstva: materialy XVII Mezhdunar. nauchno-tekhnicheskoy konferentsii [Actual Issues of Architecture and Construction: Proc. of the XVII International Scientific-Technical Conf.]. Novosibirsk, NGASU (Sibstrin), pp. 134-139, EDN: CMDRNG. (In Russian).

Информация об авторах

Н. В. Ханов – заведующий кафедрой гидротехнических сооружений, доктор технических наук, профессор, Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К. А. Тимирязева (127434, г. Москва, ул. Тимирязевская, д. 49), nvkhanov@yahoo.com, khanov@rgau-msha.ru, AuthorID: 464889, SPIN-код: 4314-8184, WoS ResearcherID: L-1087-2013, Scopus Author ID: 6603959022, ORCID: 0000-0002-5764-4734;

С. Е. Лисичкин – главный специалист, доктор технических наук, Филиал Проектно-изыскательского и научно-исследовательского института «Гидропроект» имени С. Я. Жука – Научно-исследовательский институт энергетических сооружений (125363, г. Москва, пр-д Строительный, д. 7А, к. 29), lisichkin1989@rambler.ru, AuthorID: 368472, SPIN-код: 5423-0643, Scopus Author ID: 6603919071, ORCID: 0000-0003-2761-331X;

Н. В. Сермавбрин – заместитель директора, КАВКАЗ.РФ (123112, г. Москва, ул. Тестовская, д. 10, эт. 26, пом. I), n.sermavbrin@mail.ru, ORCID: 0009-0002-7217-2891;

Н. Б. Мартынова – доцент кафедры сельскохозяйственного строительства, кандидат технических наук, доцент, Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К. А. Тимирязева (127434, г. Москва, ул. Тимирязевская, д. 49), nmartynova@rgau-msha.ru, AuthorID: 858669, SPIN-код: 8801-5790, WoS ResearcherID: AAE-7292-2022, Scopus Author ID: 57224164541, ORCID: 0000-0002-5282-5835;

Д. А. Алексеев – преподаватель кафедры гидротехнических сооружений, Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К. А. Тимирязева (127434, г. Москва, ул. Тимирязевская, д. 49), daniil.alekseev.1996@mail.ru, SPIN-код: 8085-3065, ORCID: 0009-0009-1890-3471.

Information about the authors

N. V. Khanov – Head of the Department of Hydrotechnical Construction, Doctor of Technical Sciences, Professor, Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy (127434, Moscow, Timiryazevskaya st., 49), nvkhanov@yahoo.com, khanov@rgau-msha.ru, AuthorID: 464889, SPIN-code: 4314-8184, WoS ResearcherID: L-1087-2013, Scopus Author ID: 6603959022, ORCID: 0000-0002-5764-4734;

S. E. Lisichkin – Chief Specialist, Doctor of Technical Sciences, Branch of Design, Survey and Research Institute Hydroproject named after S. Y. Zhuk – Research Institute of Energy Structures (125363, Moscow, Stroitelny proyezd, 7A, room 29), lisichkin1989@rambler.ru, AuthorID: 368472, SPIN-code: 5423-0643, Scopus Author ID: 6603919071, ORCID: 0000-0003-2761-331X;

N. V. Sermavbrin – Deputy Director, CAUCASUS.RF (123112, Moscow, Testovskaya st., build. 10, floor 26, room I), n.sermavbrin@mail.ru, ORCID: 0009-0002-7217-2891;

N. B. Martynova – Associate Professor of the Department of Agricultural Construction, Candidate of Technical Sciences, Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy (127434, Moscow, Timiryazevskaya st., 49), nmartynova@rgau-msha.ru, AuthorID: 858669, SPIN-code: 8801-5790, WoS ResearcherID: AAE-7292-2022, Scopus Author ID: 57224164541, ORCID: 0000-0002-5282-5835;

D. A. Alekseev – Lecturer of the Department of Hydraulic Engineering Structures, Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy (127434, Moscow, Timiryazevskaya st., 49); daniil.alekseev.1996@mail.ru, SPIN-code: 8085-3065, ORCID: 0009-0009-1890-3471.

*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 24.04.2026; одобрена после рецензирования 16.07.2026;
принята к публикации 28.09.2026.*

*The article was submitted 24.04.2026; approved after reviewing 16.07.2026; accepted for
publication 28.09.2026.*