

Экспериментальные исследования железобетонных конструкций системы «бычки ГЭС – напорная стена здания ГЭС», усиленной предварительно напряженной базальтокомпозитной арматурой. Часть I

Олег Дмитриевич Рубин , Антон Сергеевич Антонов* , Амер Алмасри 

Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, 129337, Москва, Ярославское шоссе, 26, Российская Федерация

* Автор, ответственный за переписку: e-mail: antonov.an.s@yandex.ru

АННОТАЦИЯ

Введение. При длительной эксплуатации напорных русловых зданий гидроэлектростанций возникают технические изменения, которые приводят к снижению эксплуатационных свойств в железобетонных конструкциях. Для обоснования новой технологии (нанотехнологии) усиления длительно эксплуатируемых гидротехнических сооружений на основе применения предварительно напряженной арматуры из наноматериалов (базальтокомпозитной арматуры) проведен комплекс экспериментальных исследований с элементами расчетных исследований, учитывающий характерные особенности железобетонных конструкций ГЭС. **Методы и материалы.** Экспериментальные исследования проводились на основе железобетонных моделей гидротехнических сооружений «бычки ГЭС – напорная стена здания ГЭС» (масштаб М 1:25), которые были изготовлены и испытаны на статическое воздействие; после чего они были усилены внешним армированием из наноматериала – предварительно напряженной базальтокомпозитной арматуры, установленной в двух направлениях: вдоль и поперек потока. Была разработана пространственная конечно-элементная модель руслового здания ГЭС для расчетных исследований НДС с учетом сейсмических воздействий более 8 баллов в рамках динамической теории. **Результаты.** В результате экспериментальных исследований опытных железобетонных моделей гидротехнических сооружений «бычки ГЭС – напорная стена здания ГЭС» определен характер трещинообразования, ширина раскрытия трещин и межблочных строительных швов, зафиксированных по величине выше в неусиленных железобетонных опытных моделях, чем в усиленных предварительно напряженной базальтокомпозитной арматурой моделях. В опытных железобетонных моделях при действующих нагрузках определены растягивающие напряжения в стальной арматуре в зоне сопряжения бычков и напорной стены, которые практически достигли величины, соответствующей пределу текучести. В настоящей работе были выполнены расчеты руслового здания ГЭС с применением динамической теории расчета при действии сейсмических нагрузок более 8 баллов. При этом были получены деформации сооружения и напряжения в его элементах в различные периоды времени (в секундах), отсчитывая от начала сейсмического воздействия. **Обсуждение.** Было получено, что новая технология (нанотехнология) усиления с применением наноматериала, предварительно напряженная базальтокомпозитной арматуры – поперек и вдоль потока, – приводит к снижению растягивающих напряжений в стальной горизонтальной арматуре поперек потока в напорной стене и в бычках более чем в 1,5 раза с перераспределением на базальтокомпозитную арматуру. При сейсмических воздействиях работа вышеуказанных конструкций будет более сложной и параметры этой работы необходимо определять расчетами с учетом всех факторов, которые позволят изучить и обеспечить длительную безопасную эксплуатацию гидротехнических сооружений ГЭС. Для достижения этой цели необходимо разработать трехмерную математическую модель железобетонных экспериментальных конструкций и провести её верификацию с использованием комплекса полученных экспериментальных данных. Далее верифицированную расчетную математическую модель возможно применить для расчетов НДС здания ГЭС при действии комплекса нагрузок и воздействий: статических, гидравлических, температурных, сейсмических. **Заключение (выводы).** На основе проведенного комплекса экспериментальных и расчетных исследований опытных железобетонных моделей «бычки ГЭС – напорная стена здания ГЭС», усиленных предварительно напряженной базальтокомпозитной арматурой, была обоснована нанотехнология усиления железобетонных конструкций длительно эксплуатируемых гидротехнических сооружений на основе применения предварительно напряженной арматуры из наноматериалов (базальтокомпозитной арматуры), в том числе определялись несущая способность, перемещения, ширина раскрытия межблочных строительных швов и трещин, деформации стальной и базальтокомпозитной арматуры в зависимости от способа усиления железобетонных конструкций внешним армированием.

© Рубин О.Д., Антонов А.С., Алмасри А., 2026

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: гидротехнические сооружения, бычки ГЭС, напорная стена здания ГЭС, межблочные строительные швы, нанотехнология усиления, предварительное напряжение, наноматериал - базальтокомпозитная арматура, ширина раскрытия межблочных швов и трещин, перемещения

ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ НАУЧНОЙ РАБОТЫ, РЕЗУЛЬТАТОМ КОТОРОЙ СТАЛА ПУБЛИКАЦИЯ: Работа выполнена инициативно из личных средств авторов при научно-технической поддержке филиала АО «Институт Гидропроект»–«НИИЭС».

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:

Рубин О.Д., Антонов А.С., Алмасри А. Экспериментальные исследования железобетонных конструкций системы «бычки ГЭС – напорная стена здания ГЭС», усиленной предварительно напряженной базальтокомпозитной арматурой. Часть I. *Нанотехнологии в строительстве*. 2026; 18(4):483–494. <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2026-18-4-483-494>. – EDN: PRJLOE.

Experimental studies of reinforced concrete structures in the “HPP supporting piers – powerhouse headwall” system strengthened with prestressed basalt composite reinforcement. Part I

Oleg D. Rubin , Anton S. Antonov* , Amer Almasri 

National Research Moscow State University of Civil Engineering, 129337, Moscow, Yaroslavskoye shosse, 26, Russian Federation

* Corresponding author: e-mail: antonov.an.s@yandex.ru

ABSTRACT

Introduction. With long-term operation of head run-of-river powerhouses of hydroelectric power plants (HPP), technical changes occur that lead to a decrease in operational properties in reinforced concrete structures. To substantiate a new nanotechnology for strengthening long-term operated hydraulic structures based on the use of prestressed reinforcement from nanomaterials (BFRP), a set of experimental studies with elements of computational studies was carried out, taking into account the characteristic features of reinforced concrete structures of HPPs. **Methods and materials.** Experimental studies were carried out on the basis of reinforced concrete models of hydraulic structures "HPP supporting piers – powerhouse headwall" (scale M 1:25), which were manufactured and tested for static impact; after which they were strengthened with external reinforcement made of prestressed BFRP nanomaterial, with rebars installed in two directions: along and across the flow. A 3D finite element model of a run-of-river HPP powerhouse was developed to analyze its stress-strain state (SSS), taking into account seismic actions of more than 8 points (MSK scale) within the framework of the dynamical theory. **Results.** As a result of experimental studies of reinforced concrete models of hydraulic structures "hydroelectric power plant piers – headwall of the HPP powerhouse", the nature of crack formation, the width of crack opening and inter-block construction joints were determined, which were recorded in magnitude higher in non-strengthened reinforced concrete experimental models than in models strengthened with prestressed basalt composite reinforcement. In experimental reinforced concrete models under the acting loads, tensile stresses in the steel reinforcement in the area of the interface of the piers and the headwall were determined, which almost reached the value corresponding to the yield strength. In the article, calculations of the run-of-river HPP powerhouse were performed using the dynamic theory of calculation under the action of seismic loads of more than 8 points (MSK scale). At the same time, deformations of the structure and stresses in its elements in different periods of time (in seconds) were obtained, counting from the beginning of the seismic action. **Discussion.** It was obtained that the new technology of strengthening using reinforcement made of BFRP nanomaterial across and along the river flow leads to a decrease in tensile stresses in steel horizontal reinforcement across the flow in the headwall and in piers by more than 1.5 times with redistribution to basalt composite reinforcement. In case of seismic actions, the operation of the above structures will be more complex and the parameters of this work must be determined by calculations, taking into account all factors that will allow to study and ensure long-term safe operation of HPP structures. To achieve this goal, it is necessary to develop a 3D mathematical model of experimental reinforced concrete structures and verify it using a set of experimental data obtained. Further, the verified mathematical model can be used to calculate the SSS of the HPP powerhouse under the action of a set of loads and influences: static, hydraulic, temperature, seismic. **Conclusion.** On the basis of a set of experimental and computational studies of experimental reinforced concrete models "HPP supporting piers – powerhouse headwall", strengthened with prestressed basalt composite reinforcement, nanotechnology for strengthening reinforced concrete structures of long-term operated hydraulic structures based on the use of prestressed reinforcement from nanomaterials (BFRP) was substantiated, including the load-bearing capacity, displacement, width of opening of

inter-block construction joints and cracks, deformations of steel and basalt composite reinforcement depending on the method of strengthening of reinforced concrete structures by external reinforcement.

KEYWORDS: hydraulic structures, HPP supporting piers, HPP powerhouse headwall, inter-block construction joints, nanotechnology of reinforcement, prestress, basalt composite nanomaterial, width of opening of inter-block joints and cracks, displacements

SOURCES OF FUNDING FOR THE SCIENTIFIC WORK THAT RESULTED IN THE PUBLICATION: The Study was carried out from the personal funds of the authors with the scientific and technical support of the branch of JSC "Institute of Hydroproject" – NIIES.

FOR CITATION:

Rubin O.D., Antonov A.S., Almasri A. Experimental studies of reinforced concrete structures in the "HPP supporting piers – powerhouse headwall" system strengthened with prestressed basalt composite reinforcement. Part I. *Nanotechnologies in Construction*. 2026;18(4):483–494. <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2026-18-4-483-494>. – EDN: PRJLOE.

ВВЕДЕНИЕ

Русловые гидроэлектростанции (ГЭС) представляют существенную часть эксплуатируемых ГЭС [1–5]; находясь в руслах рек, входят в состав сооружений напорного фронта.

На рисунке 1 представлен вертикальный разрез вдоль потока напорного руслового здания ГЭС, на котором видны основные несущие напорные конструкции: бычки, верховая стена машзала и др., предназначенные для восприятия нагрузок со стороны верхнего бьефа нагрузки и передачи их на другие несущие конструкции.

В ходе многолетней эксплуатации напорных русловых зданий ГЭС возникают отклонения от проектных предпосылок, которые вызваны непроектными перемещениями и осадками, раскрытием межблочных строительных швов и трещин, изменением состояния бетонных и железобетонных конструкций и их оснований, изменением характера и величины действующих нагрузок и др., что приводит к снижению параметров безопасной эксплуатации.

В период проектирования большинства гидроузлов [6] проводились сейсмические расчеты на основе линейно-спектральной теории согласно СНиП-А.12-62 [7] и СНиП II-7-81* [8] с использованием карт ОСР-97, применявшихся в тот период. В настоящее время действуют новые нормы СП 14.13330.2018 [9], предусматривающие повышение сейсмичности на 1–2 балла в соответствии с ОСР-2015, а также динамическую теорию расчетов ГТС I-го и II-го классов на основе акселерограмм.

Выполненные при обосновании прочности и устойчивости проектных решений русловых зданий ГЭС расчеты удовлетворяли требованиям нормативных документов.

Однако в ходе многолетней эксплуатации ГЭС основные несущие железобетонные конструкции претерпевают отклонения от проектных предпосылок, в том числе при изменении прочностных и деформационных характеристик, характера действия нагрузок и др.

В этой связи научно-исследовательский и инженерный персонал должен решать проблемы обес-

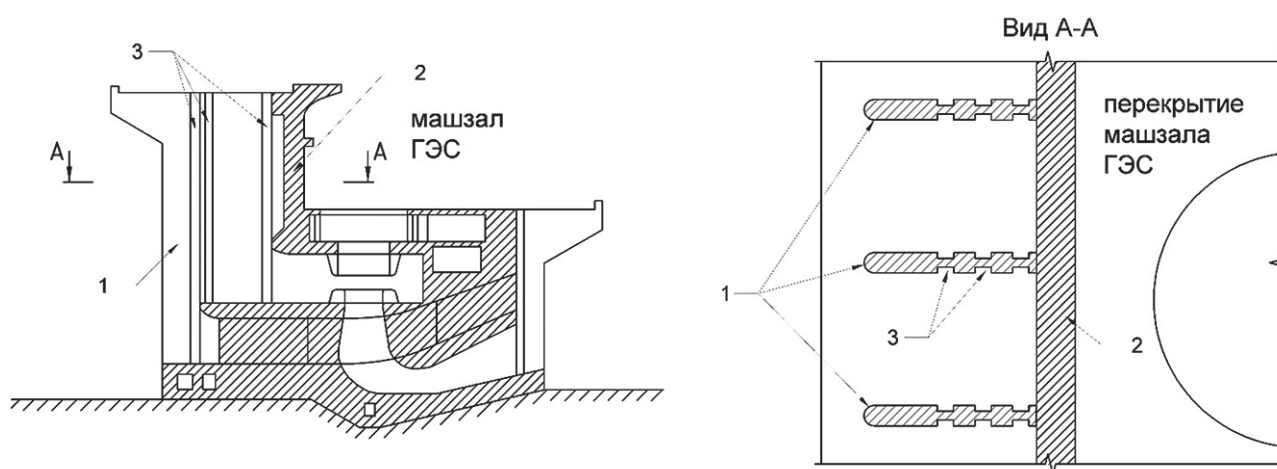


Рис. 1. Вертикальный разрез вдоль потока напорного руслового здания ГЭС: 1 – бычки; 2 – напорная стена машзала; в сечении А-А показаны: 1 – бычки; 2 – напорная стена машзала; 3 – пазы затворов

печения безопасности при эксплуатации ГЭС в условиях снижения запасов надежности, изменения характера действующих нагрузок, включая сейсмичность более высокой интенсивности.

Проблема обоснования нанотехнологии усиления железобетонных сооружений и конструкций широко изучается различными учеными, при этом распространение получили наноматериалы (композитные материалы), позволяющие обеспечить необходимые запасы несущей способности практически без изменения их массогабаритных размеров.

В исследованиях [10] произведена оценка характеристик наноматериала — базальтокомпозитной арматуры (BFRP) — в отличие от углепластиковой (CFRP) и стальной арматуры. Рассмотрены изгибаемые и сжатые модели. При этом определялись и другие характеристики (такие как механические, температурные, химические) образцов BFRP, CFRP и стальной арматуры. Было зафиксировано увеличение предельных напряжений в композитных арматурных стержнях, в сопоставлении со стальной арматурой при одновременном снижении пластичности. Отмечено, что композитные стержни из BFRP и CFRP обладают повышенной устойчивостью к агрессивным воздействиям окружающей среды.

В исследованиях [11] рассмотрена арматура из BFRP на основе волокон из базальта, эпоксидных и полиэфирных смол. Стержень BFRP имеет непрерывное спиральное оребрение, которое образуется базальтовым волокном, чтобы улучшить сцепление с бетоном. Выявлены преимущества арматуры BFRP по сравнению со стальной арматурой:

- Прочность на растяжение в два раза больше, чем стальной арматуры;
- В отличие от стальной арматуры BFRP не подвержена коррозии;
- Вес BFRP на 89% меньше, чем стальной арматуры;
- коэффициент температурного расширения близок к бетону;
- волокна из базальта не являются проводниками влаги;
- является диэлектриком;
- не является проводником магнитных полей;
- диапазон рабочих температур от -70°C до $+100^{\circ}\text{C}$, в том числе в огнестойких помещениях.

Таким образом, использование наноматериала — базальтокомпозитной арматуры — увеличивает срок службы железобетонных конструкций, что приводит к созданию длительно эксплуатируемых сооружений, к которым относятся сооружения гидроэлектростанций.

В работе [12] рассматриваются характеристики бетонных конструкций, армированных наноматериалом — базальтокомпозитной арматурой (BFRP) — по-

сле воздействия циклов замораживания-оттаивания (FT). В результате испытаний на выдергивание после 100 и 200 циклов FT (при этом температура заморозки -20°C) была зафиксирована практически одинаковая прочность сцепления BFRP с конструкцией, что является важным для ГЭС, расположенных в различных климатических поясах.

В ходе испытаний конструкций с использованием наноматериала — базальтовой композитной арматуры (BFRP) — при изгибе [13] была достигнута эффективность применения BFRP при усилении и ремонте длительно эксплуатируемых конструкций в отличие от традиционных методов. При этом отмечалось, что арматура BFRP имела большую прочность и более низкий модуль упругости (по сравнению со стальной арматурой), что согласовывалось с [10].

Статья [14] посвящена изучению изгибаемых бетонных элементов с наноматериалами — стержнями BFRP. Всего было изготовлено и испытано до разрушения восемь бетонных конструкций длиной 3100 мм и сечением 200х300 мм. Шесть конструкций были армированы арматурой BFRP диаметром 8, 12 и 16 мм с ребристой поверхностью, а две контрольные железобетонные конструкции были армированы стальной арматурой 10 М и 15 М. Отмечается, что все конструкции разрушились по сжатой зоне бетона с высокой их деформативностью.

В статье отмечается, что на поведение конструкций из наноматериала BFRP-RC существенно влияет осевая жесткость изгибаемой базальтокомпозитной арматуры (E_A). Следует отметить, что выполненные эксперименты подтверждают эффективность использования предварительно напряженных стержней BFRP, позволяющей реализовать высокую прочность и деформативность наноматериалов.

Для изучения несущей способности бетонных конструкций, армированных наноматериалом — базальтокомпозитной арматурой [15], — были испытаны 8 моделей с арматурой из BFRP диаметром 10, 13, 16 и 25 мм, имеющих низкий, средний и высокий коэффициенты армирования. Все конструкции разрушались по бетону сжатой зоны, при этом высокий коэффициент армирования в некоторой степени уменьшает прогиб конструкций. Авторами отмечается, что предельные нагрузки, воспринимаемые конструкциями, напрямую зависят от коэффициента армирования. Также в статье представлено сравнение модели прогнозирования с экспериментальными моделями, что подтвердило достоверность исследования.

В статье [16] представлены результаты экспериментов при изгибе предварительно напряженных конструкций, армированных наноматериалом BFRP, в том числе с оценкой потерь предварительного напряжения. Было изготовлено 5 конструкций,

из которых три армированы BFRP диаметром 6 мм, предварительно напряженными до 20%, 30% и 40% от предельного уровня предварительного напряжения. Потери предварительного напряжения контролировались с помощью тензометрических датчиков на арматурных стержнях. Кроме того, две контрольные конструкции были армированы напрягаемыми BFRP и стальными стержнями той же площади поперечного сечения, соответственно. Размеры всех образцов составляли 125×200×1900 мм.

По результатам экспериментов конструкций (армированных наноматериалами), испытанных при изгибе до разрушения, представлены следующие выводы:

- предварительное напряжение конструкций, армированных BFRP более чем на 30% от предельной прочности стержней на растяжение, улучшило эксплуатационные характеристики конструкций до уровня, превышающего показатели образцов, армированных стальными стержнями;
- предельные прогибы предварительно напряженных конструкций зафиксированы ниже по сравнению с ненапряженными конструкциями с BFRP;
- образование трещин на поверхности конструкций было замерено для предварительно напряженных конструкций соответственно уровню предварительного напряжения.

Следует отметить, что проведенные исследования не содержат данных по усилению вышеуказанных конструкций системой внешнего армирования.

Целью исследований [17] было изучение при изгибе конструкций, усиленных по технологии NSM (near surface mounted) с использованием наноматериала — базальтокомпозитной арматуры BFRP — для оценки эффективности усиления железобетонных конструкций. Кроме того, рассматривалась нанотехнология усиления предварительным напряжением вблизи поверхности конструкций (PNSM), которая в определенной степени объединяет две известные технологии: «внешнего предварительного напряжения» и «NSM».

В данном исследовании рассматривались:

- неусиленные и усиленные образцы;
- арматура усиления BFRP и GFRP;
- метод NSM и PNSM при усилении;
- 30%-е и 50%-е уровни преднапряжения (от предельной растяжимости BFRP);
- расположение снизу или сбоку композитной арматуры при использовании технологии NSM.

В ходе исследований было выявлено преимущество при использовании наноматериала BFRP для усиления бетонных элементов методами NSM и PNSM, а также преимущество армирования из наноматериала BFRP.

В статье [18] представлены результаты сравнения базальтокомпозитной арматуры (BFRP) и стальной арматуры в части основных характеристик.

Исследовано разрушение при сдвиге бетонных элементов, армированных предварительно напряженной BFRP, при отсутствии в них арматуры хомутов. В статье приводятся результаты численных исследований в рамках вычислительной программы ANSYS, которые хорошо согласовывались с экспериментальными данными. Подтверждено преимущество нанотехнологии усиления железобетонных конструкций в условиях длительной эксплуатации.

В работе [19] представлены результаты экспериментальных исследований бетонных конструкций с предварительно напряженной арматурой.

Результаты экспериментов были проанализированы, созданы расчетные нелинейные модели в программном комплексе ANSYS и получено достаточно хорошее совпадение экспериментов и расчетов в части характера разрушения и численных значений разрушающей нагрузки, а также распределение напряжений.

В статье [20] проанализированы результаты испытаний бетонных конструкций с предварительно напряженной арматурой из наноматериала (базальтокомпозита), в том числе с внешними хомутами и без них. Отмечается, что проблемным является применение бетонных конструкций со стальной арматурой при действии водной и соленой среды, а также химических веществ по причине интенсивной коррозии, в связи с чем необходимо применение армирования из наноматериала (BFRP). Для предотвращения интенсивного трещинообразования в конструкциях необходимо предварительно преднапрягать арматуру BFRP. Исследовались две неусиленные модели при действии сдвига. Две модели, усиленные внешними стальными хомутами, разрушились от изгиба при текучести арматуры. Таким образом, для обеспечения прочности требуется учитывать совместное действие изгибающего момента и сдвига в пролете конструкции.

Результаты исследований, опубликованные в источниках [10–20], подтверждают, что материалы настоящей статьи несомненно актуальны и необходимы для выполнения нанотехнологичного усиления железобетонных сооружений и конструкций ГЭС, находящихся в условиях длительной эксплуатации, в том числе высокой сейсмической активности.

Композитные арматурные стержни из наноматериала имеют следующие преимущества по сравнению со стальной арматурой:

- прочность на растяжение в 2,5–3,0 раза больше;
- меньший вес более чем в 4,0 раза;
- имеют высокую стойкость к щелочной среде бетона и другим агрессивным средам;
- являются диэлектриками.

Целесообразность применения базальтокомпозитной арматуры обосновывается оптимальными соотношениями прочностных характеристик и стоимости.

Авторами настоящей статьи выполнен комплекс экспериментальных и расчетных исследований для обоснования нанотехнологии усиления в целях повышения несущей способности железобетонных конструкций ГТС.

МЕТОДЫ И МАТЕРИАЛЫ

Авторами статьи выполнены экспериментальные исследования опытных железобетонных моделей «бычки ГЭС – напорная стена здания ГЭС», усиленных предварительно напряженной базальтокомпозитной арматурой, в том числе определялись несущая способность, перемещения, ширина раскрытия межблочных строительных швов и трещин, деформации стальной и базальтокомпозитной арматуры в зависимости от способа усиления железобетонных конструкций внешним армированием.

Также были проведены расчеты напряженно-деформированного состояния на действие статических нагрузок и сейсмических воздействий более 8 баллов с целью определения необходимости усиления конструкций здания ГЭС способами, представленными в экспериментальной части исследований.

Этапность работ представляла собой следующую последовательность:

- Разработка математической модели руслового здания ГЭС и расчетные исследования НДС в рамках математического комплекса ANSYS при действии статических нагрузок (вес конструкций сооружения и оборудования, гидравлическая нагрузка со стороны верхнего бьефа, вертикальное давление воды на подошву сооружения и др.), температурных и сейсмических воздействий.
- Лабораторные испытания опытных моделей ГТС (бычков и напорной стены машзала здания ГЭС) с межблочными строительными швами, с армированием стальной арматурой и внешней предварительно напряженной базальтокомпозитной арматурой.

Для опытных моделей «бычки ГЭС – напорная стена здания ГЭС» использован бетон класса В30, стальная (коэффициент армирования $\mu < 0,005$) и базальтокомпозитная стержневая арматура (табл. 1).

Экспериментальные исследования на физических железобетонных моделях выполнялись в лаборатории филиала АО «Институт Гидропроект» – «НИИЭС» с использованием специализированного силового металлического 100-тонного стэнда и гидравлического оборудования:

1. Домкрат гидравлический (создание статической нагрузки) ДГ-50:
 - создаваемое усилие – 50 тонн;
 - величина выдвижения штока (длина хода) – 60 мм;
 - рабочее давление – 45,5 МПа.
2. Гидравлическая насосная станция МР700 ENERPAC:
 - номинальное давление – 70,0 МПа;
 - величина выдвижения штока (длина хода) – 26,5 мм.
3. Домкрат гидравлический (создание натяжения арматурных стержней, рис. 2) «CONER» (№ 11920):
 - максимальное давление при натяжении – 400 атм.

Измерительная аппаратура:

1. Тензорезисторы TML FLA-10-11 с базой 10 мм (для арматуры) сопротивлением 120 Ом. Номер в Госреестре средств измерений 79148-20.
2. Тензометрическая станция «НТП Горизонт». Номер в Госреестре средств измерений 79484-20 (табл. 2).
3. Индикаторы часового типа ЗИЧТ. Номер в Госреестре средств измерений 76658-19 (измерение ширины раскрытия межблочных строительных швов и трещин; измерение прогибов). Цена деления – 0,005 мм.

Наибольшая разность погрешностей прямого хода индикатора: в пределах рабочего участка шкалы – 0,005 мм и в пределах нормированного участка шкалы – 0,003 мм.

Таблица 1. Характеристики материалов, используемых для изготовления моделей

№ п.п.	Характеристики	Бетон класса В30, МПа	Арматура, МПа	
			Стальная	Базальтокомпозитная
1	Прочность на сжатие	$R_{bn} = 22,0$	–	–
2	Прочность на растяжение	$R_{bt} = 1,80$	$R_{sn} = 390$	$R_m = 1000$
3	Модуль деформации	$E_p = 32\,500$ (сжатие)	$E_s = 200\,000$ (растяжение)	$E_m = 50\,000$ (растяжение)



Рис. 2. Испытание опытной железобетонной модели (показан процесс натяжения базальтокомпозитной арматуры):

- насосная гидросиловая станция «ENERPAC»;
- гидравлический домкрат для натяжения базальтокомпозитной арматуры «CONER»;
- масляные распределители

Таблица 2

№ п.п.	Характеристики	Тензометрическая станция «НТП Горизонт»
1	Количество измерительных каналов	32
2	Схемы включения тензорезисторов	мост, полумост, четвертьмост
3	Номинальное сопротивление тензорезисторных преобразователей	50–1000 Ом
4	Диапазоны измерений коэффициента преобразования	± 5 ; ± 10 мВ/В
5	Пределы допускаемой относительной погрешности измерений частоты колебаний	$\pm 5 \cdot 10^{-5}$
6	Внешние интерфейсы	RS – 485, USB; Bluetooth

Первоначально был выполнен анализ данных проведенных ранее лабораторных исследований для определения потерь предварительного напряжения в АБК, установленной в бетонном элементе, а также для определения прочности бетонной конструкции, армированной преднапряженной АБК [16, 21, 22].

Анализ данных выполненных ранее лабораторных исследований показал, что потери предварительного натяжения стержневой стальной арматуры через 90 часов составили 2,9–4,0%, в то время как потери

предварительного напряжения АБК составили 3,4% и остались далее на том же уровне.

Для решения вышеуказанной задачи по обоснованию нанотехнологии усиления железобетонных конструкций системы «бычки ГЭС – напорная стена здания ГЭС», с применением наноматериала – предварительно напряженной базальтокомпозитной арматуры – авторы провели лабораторные испытания опытных моделей, учитывающих характерные признаки гидротехнического железобетона.

Представленная работа выполнена в продолжение и развитие проведенных ранее исследований [23].

Для экспериментальных исследований были разработаны опытные железобетонные модели «бычки ГЭС – напорная стена здания ГЭС» в масштабе М 1:25 (рис. 3), имеющие межблочные строительные швы (бетонирование моделей производилось тремя блоками с целью создания межблочных швов), армирование стальной арматурой $\phi 12A400$.

После образования трещин в опытных железобетонных моделях в двух направлениях производилось их усиление наноматериалом – предварительно напряженной базальтокомпозитной арматурой (рис. 4). Этапы усиления и испытания опытных моделей представлены на рисунке 5.

В настоящей работе были выполнены расчеты руслового здания ГЭС с применением динамической теории расчета при действии сейсмических нагрузок более 8 баллов.

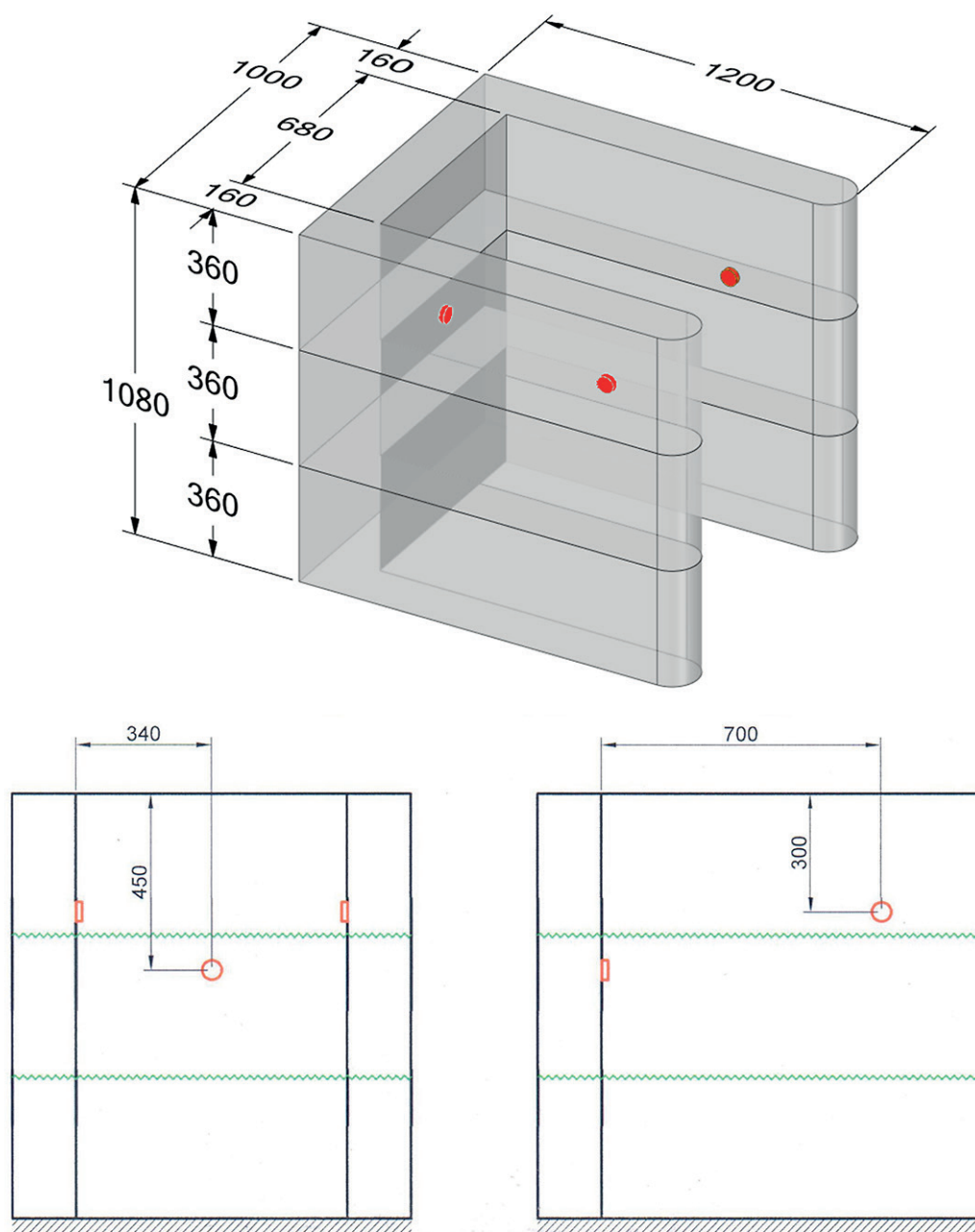


Рис. 3. Опытная железобетонная модель «бычки ГЭС – напорная стена здания ГЭС» в масштабе М 1:25 с расположением мест действия опытных нагрузок (размеры даны в мм)

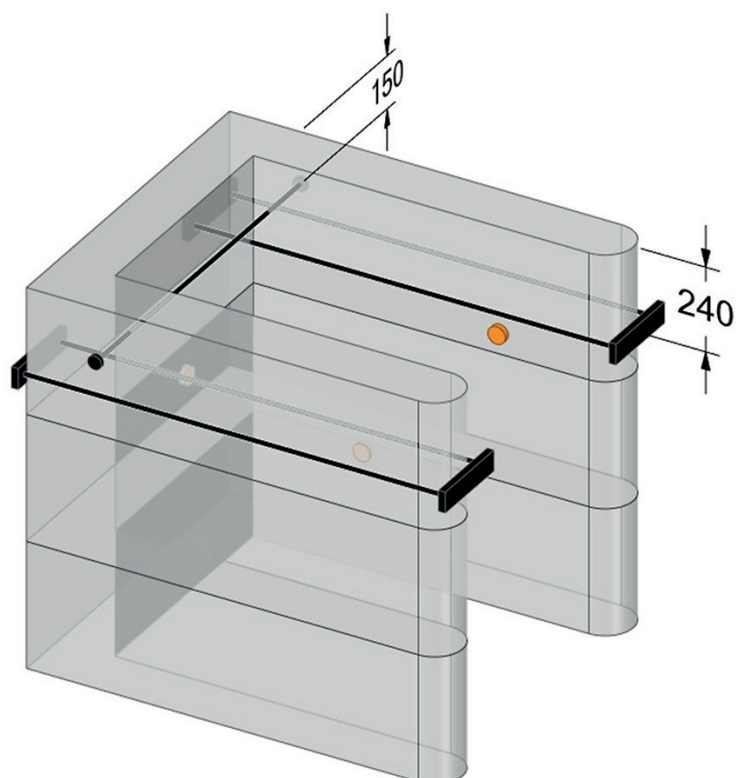


Рис. 4. Схемы размещения (вдоль и поперек потока) предварительно напряжённой базальтокомпозитной арматуры усиления опытных моделей

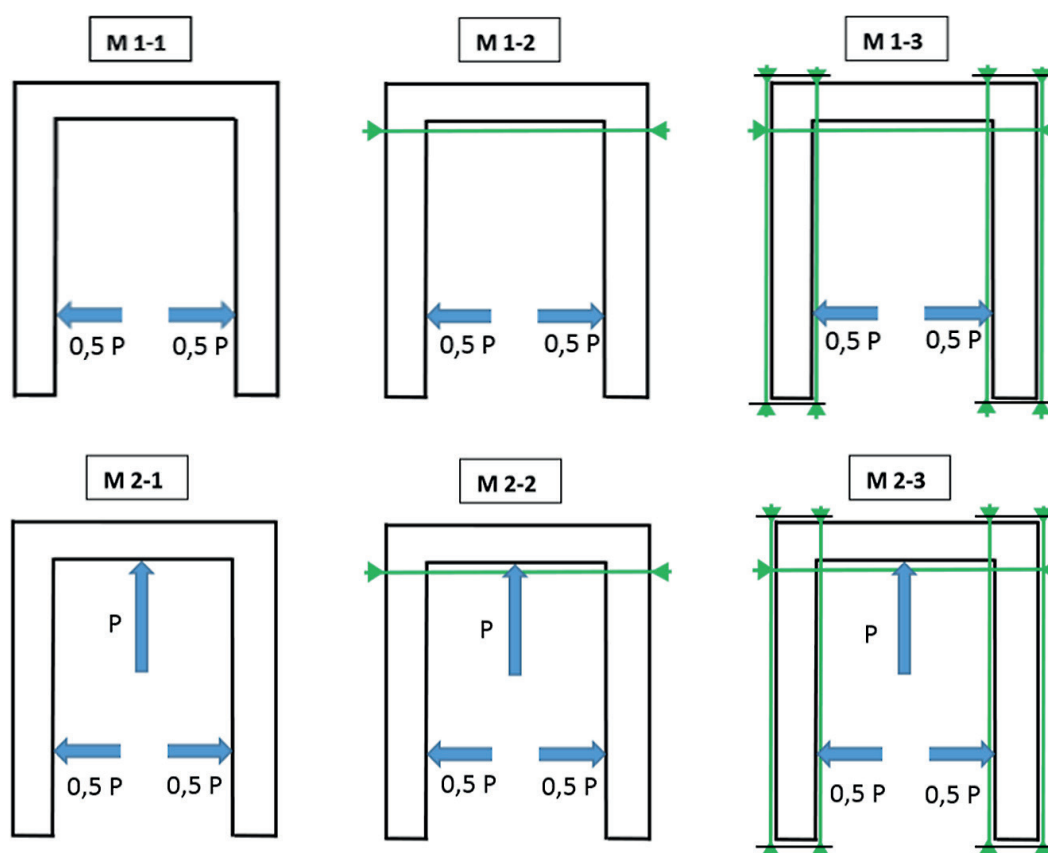


Рис. 5. Этапы усиления и испытания опытных железобетонных моделей

При этом были получены деформации сооружения и напряжения в его элементах в различные периоды времени (в секундах), отсчитывая от начала сейсмического воздействия.

На рисунке 6а представлено напряженное состояние в конструкциях здания ГЭС при действии статических нагрузок и сейсмических воздействий на основе динамической теории расчета в периоды времени 2,62 сек и 4,94 сек от начала сейсмического воздействия.

В течение процесса сейсмического воздействия происходит перераспределение действующих усилий и, соответственно, напряженного состояния.

Максимальные растягивающие напряжения, достигающие 4,7 МПа, действуют в напорной стене здания ГЭС (рисунок 6а) через 2,62 сек после начала

сейсмического воздействия, а через 4,94 сек в бычках здания ГЭС (рис. 6б) возникают максимальные растягивающие напряжения (до 3,5 МПа).

Под действием растягивающих напряжений, которые превышают прочность бетона при растяжении, происходит образование и раскрытие трещин в межблочных строительных швах и в том числе нарушение контакта «подшва здания ГЭС – основание» (рис. 5), что негативно влияет на устойчивость и прочность здания ГЭС.

На основе представленных результатов выполненных расчетов здания ГЭС в рамках динамической теории при действии сейсмаинтенсивностью более 8 баллов возникает необходимость проведения мероприятий по усилению и повышению сейсмостойкости железобетонных конструкций здания ГЭС.

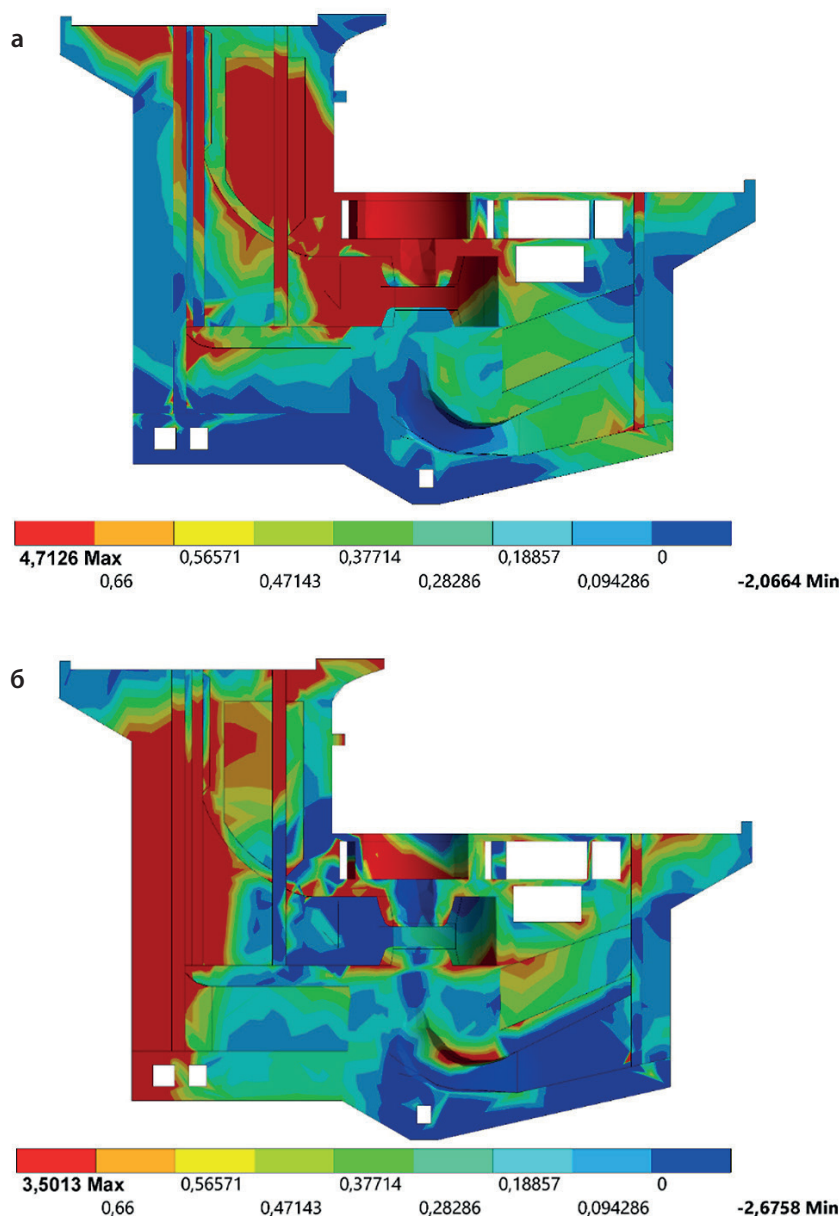


Рис. 6. Картина распределения главных напряжений, МПа: а) в напорной стене машзала (через 2,62 сек после начала действия сейсма); б) в бычках (через 4,94 сек после начала действия сейсма)



Рис. 7. Пространственный арматурный каркас железобетонных моделей с устанавливаемой опалубкой 1-го яруса бетонирования

При этом наиболее эффективным представляется использование нанотехнологии усиления.

Опытные модели включали арматурные каркасы из стальной арматуры $\varnothing 12$ A400 (рис. 7) с оснащением тензорезисторами базой 10 мм. В ходе экспериментальных исследований фиксировались следующие характеристики:

- а) характер образования трещин (включая их протяженность и ширину раскрытия;
- б) величина расхождения бычков;
- в) напряжения в стальной арматуре;

г) приращения напряжений в предварительно напряженной базальтокомпозитной арматуре;

д) прочность опытных моделей «бычки ГЭС – напорная стена здания ГЭС».

Предварительное напряжение базальтокомпозитной арматуры в опытных моделях М1-2, М1-3, М2-2 и М2-3 составило 300 МПа, определенное как $0,30 \cdot R_{f,n} = 0,30 \cdot 1000 = 300$ МПа (коэффициент 0,30 не превышает 0,45 в соответствии с п. 7.1.1. СП 295.1325800.2017 [24]).

Продолжение следует.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- Аршеневский Н.Н. Гидроэлектрические станции / Н.Н. Аршеневский, М.Ф. Губин. М.: Энергоатомиздат, 1987;464. – EDN: SNSPBJ
- Raja A.K., Srivastava A.P., Dwivedi M. Power Plant Engineering. New Delhi: New Age International. 2006;354. ISBN 81-224-1831-7. Available from: https://www.academia.edu/attachments/63581667/download_file (access date 05.04.2026)
- Lenkov A. Yu., Fisenko V. F. Experience gained from operation of the hydraulic structures of the Votkinsk hydroelectric power plant. *Power Technology and Engineering*. 2017;51(1):33-39. <https://doi.org/10.1007/s10749-017-0779-y> – EDN: XNDQPU.
- Vasilevskaya L. S., Anufrenkova, P. S., Gracheva D. A. Evaluation of Concrete Structure Condition of the Volzhskaya Hydroelectric Power Plant. *Power Technology and Engineering*. 2018; 52(2):181-184. <https://doi.org/10.1007/s10749-018-0929-x> – EDN: YBPZOH.
- Rodrigues R. V. Structural Design of a Surface Hydropower Plant. *Technical University of Lisbon*. 2014;1-9. Available from: <https://fenix.tecnico.ulisboa.pt/downloadFile/563345090413168/resumo.pdf> (access date 05.04.2026)
- Rubin O.D., Lisichkin, S.E., Baklykov I.V., Almasri A. Objectives of the Computational Studies of the Long-term Operational Run-of-River Buildings of Tishrin and Baath HPPs Located in Seismic Areas of Syria. *VI International Scientific Conference Construction Mechanics, Hydraulics & Water Resources Engineering (CONMECHYDRO 2024)*. Karshi; Uzbekistan. <https://doi.org/10.1063/5.0279432>
- СНиП А-П. 12-62 Строительство в сейсмических районах. Нормы проектирования. Москва. 1963; 54.
- СНиП 11-7-81* 62 Строительство в сейсмических районах. Нормы проектирования. Москва. 2006; 44.
- СНиП 14.13330.2018 62 Строительство в сейсмических районах. Нормы проектирования. Актуализированная редакция СНиП II-7-81*. Москва. 2018; 115.
- Zaki M., Tobaa A., Shehata A. Potential advantages of basalt FRP bars compared to carbon FRP bars & conventional steel. *Australian Journal of Civil Engineering*. 2020;19(1):1-16. <https://doi.org/10.1080/14488353.2020.1816638> – EDN: NENRWF

11. Subramanian N. Sustainability of RCC Structures using Basalt Composite Rebars. *The Master builder*. 2010;(9):156–164.
12. Mohamed-Akram Khanfour, Ahmed El Refai. Effect of freeze-thaw cycles on concrete reinforced with basalt fiber-reinforced polymers (BFRP) bars. *Construction and Building Materials*. 2017;145:135–146. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.03.237>
13. Elamathi E., Priyanka R., Sangeetha V. Flexural Study on Basalt Rebar Reinforced Concrete Beams. *Journal of Engineering*. 2018; 8(1):01–05.
14. Fareed Elgabbas; Ehab A. Ahmed, M.ASCE; Brahim Benmokrane. Flexural Behavior of Concrete Beams Reinforced with Ribbed Basalt-FRP Bars under Static Loads. *Journal of Composites for Construction*. 2016;21(3). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CC.1943-5614.0000752](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0000752)
15. Thilan Ovitigala, Mustapha A. Ibrahim, Mohsen A. Issa. Serviceability and Ultimate Load Behavior of Concrete Beams Reinforced with Basalt Fiber-Reinforced Polymer Bars. *ACI Structural Journal*. 2016;113(4):757–768. <https://doi.org/10.14359/51688752>
16. Pavlovic A., Donchev T. Prestensioned BFRP reinforced concrete beams: Flexural behaviour and estimation of initial prestress losses. *MATEC Web of Conferences*. 2019;289. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201928909001>
17. Sokaige H., Elgabbas F., Elshafie H. Structural behavior of RC beams strengthened with prestressed near surface mounted technique using basalt FRP bars. *Engineering Structures*. 2022;250(9):113489. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.113489> – EDN: VQHDNK.
18. Thorhallsson E., Zhelyazov T., Gunnarsson A., Snaebjornsson J.T. Concrete beams reinforced with prestressed basalt bars. *Concrete – Innovation and Design, fib Symposium*. Copenhagen; 2015.
19. A. Gunnarsson, E. R. Thorhallsson, J. Th. Snaebjornsson. Simulation of Experimental Research of Concrete Beams Prestressed with BFRP Tendons. *Nordic Concrete Research Symposium. Reykjavik, Iceland*. 2014. E.Thorhallsson, S. H. Gudmundsson. Test of prestressed basalt FRP concrete beams with and without external stirrups. *Proceedings of Fib symposium Engineering a Concrete future: Technology, modelling & Construction. At: Tel Aviv*. Israel; 2013.
20. Bellendir E.N., Rubin O.D., Lisichkin, S.E., Zyuzina, O.V. Experimental Study into Prestress Losses of Basalt Composite Reinforcement Used in the Composition of Concrete Elements. *Power Technology and Engineering*. 2021;54(5):605–608. <https://doi.org/10.1007/s10749-020-01259-y> – EDN: VLSBAJ
21. Pearson M., Donchev T., Salazar J. Long-Term Behaviour of Prestressed Basalt Fibre Reinforced Polymer Bars. *The 2nd International Conference on Rehabilitation and Maintenance in Civil Engineering. Procedia Engineering*. 2013;54:261–269. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2013.03.024>
22. Рубин О.Д., Лисичкин С.Е., Зюзина О.В. Прочность малоармированных железобетонных конструкций с межблочными строительными швами, усиленных предварительно напряженной базальтокомпозитной арматурой. *Природообустройство*. 2021;1:53–62. <https://doi.org/10.26897/1997-6011-2021-1-53-62> – EDN: ZHAYMH
23. СП 295.1325800.2017. Конструкции бетонные, армированные полимерной композитной арматурой. Правила проектирования. М: Стандартинформ, 2017;55.

ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

Авторы заявляют о том, что при подготовке статьи не использовались технологии генеративного искусственного интеллекта и технологии, основанные на искусственном интеллекте.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Рубин Олег Дмитриевич – доктор технических наук, профессор кафедры Гидравлики и гидротехнического строительства, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, 129337, Москва, Ярославское шоссе, 26, Российская Федерация, rubinod@niies.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0630-3251>

Антонов Антон Сергеевич – кандидат технических наук, доцент кафедры Гидравлики и гидротехнического строительства, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, 129337, Москва, Ярославское шоссе, 26, Российская Федерация, antonov.an.s@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8310-9604>

Амер Алмасри – аспирант кафедры Гидравлики и гидротехнического строительства, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, 129337, Москва, Ярославское шоссе, 26, Российская Федерация, ameralmasri3522@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0007-4090-4353>

ВКЛАД АВТОРОВ

Рубин Олег Д. – научное руководство; разработка концепции и развитие методологии исследования; анализ результатов исследования; написание исходного текста статьи; составление итоговых выводов.

Антонов Антон С. – проведение экспериментальной работы; обработка и анализ экспериментальных данных с применением методов машинного обучения; написание исходного текста статьи; составление итоговых выводов.

Амер Алмасри – литературный обзор; сбор и систематизация экспериментальных данных; написание исходного текста статьи.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 30.04.2026; одобрена после рецензирования 07.08.2026; принята к публикации 13.08.2026.