

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER

УДК 627.8.04

DOI: 10.22227/2305-5502.2026.1.2

## Результаты расчетных исследований русловых зданий гидроэлектростанций при сейсмических воздействиях

Амер Алмасри

Национальный исследовательский Московский государственный  
строительный университет (НИУ МГСУ); г. Москва, Россия

### АННОТАЦИЯ

**Введение.** Рассматриваются русловые напорные здания гидроэлектростанций (ГЭС). В состав таких зданий входят железобетонные бычки, напорные стены совместно с перекрытиями машинных залов, фундаментные плиты др. Они имеют межблочные строительные швы. В процессе многолетней эксплуатации возникают проблемы, из-за которых происходит снижение эксплуатационных характеристик железобетонных конструкций зданий ГЭС.

**Материалы и методы.** Железобетонная конструкция руслового напорного здания ГЭС Тишрин моделировалась в объемной постановке в рамках метода конечных элементов для определения напряженно-деформированного состояния (НДС) при сейсмическом воздействии интенсивностью более 8 баллов. Соответствующие расчеты проводились на основе динамической теории с использованием акселерограмм.

**Результаты.** Расчеты НДС железобетонного руслового напорного здания ГЭС Тишрин показали, что под действием растягивающих напряжений происходит раскрытие межблочных строительных швов, контактного шва между подошвой здания ГЭС и основанием, а также образование трещин в монолитной части.

**Выводы.** С учетом полученных результатов расчетов возникла необходимость усиления железобетонных конструкций здания ГЭС Тишрин, например, с применением предварительно напряженной композитной арматуры.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** здания ГЭС в русле реки, гидравлический напор воды, метод конечных элементов, сейсмическое воздействие интенсивностью более 8 баллов, усиление композитной арматурой, предварительное напряжение

**ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:** Алмасри А. Результаты расчетных исследований русловых зданий гидроэлектростанций при сейсмических воздействиях // Строительство: наука и образование. 2026. Т. 16. Вып. 1. Ст. 2. URL: <http://ns-journal.ru>. DOI: 10.22227/2305-5502.2026.1.2

Автор, ответственный за переписку: Амер Алмасри, [ameralmasri3522@gmail.com](mailto:ameralmasri3522@gmail.com), [lischkin1989@rambler.ru](mailto:lischkin1989@rambler.ru).

## Results of computational studies of the riverbed structures of a hydroelectric power stations under seismic loads

Amer Almasri

Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU);  
Moscow, Russian Federation

### ABSTRACT

**Introduction.** A separate category includes river-bed pressure buildings of hydroelectric power plants. Such buildings include reinforced concrete piers, beams, pressure walls together with the floors of machine rooms, foundation slabs, etc. At the same time, as an integral element, they have inter-block construction joints. During the long-term operation, problems arise, which lead to a decrease in the operational characteristics of reinforced concrete structures of hydroelectric power plant buildings.

**Materials and methods.** The reinforced concrete structure of the Tishrin hydroelectric power plant's channel pressure building was modelled using the finite element method to determine the stress-strain state under the influence of an earthquake with an intensity of more than 8 points. The corresponding calculations were performed based on dynamic theory using accelerograms.

**Results.** The calculations of the stress-strain state of the reinforced concrete channel pressure building of the Tishrin hydroelectric power plant showed that the opening of the inter-block construction joints, the contact joint between the base of the hydroelectric power plant building and the foundation, and the formation of cracks in the monolithic part occur under the influence of tensile stresses.

**Conclusions.** Based on the results of the calculations, it was necessary to reinforce the reinforced concrete structures of the Tishrin hydroelectric power plant, for example, by using pre-stressed composite reinforcement.

**KEYWORDS:** hydroelectric power plant buildings in the riverbed, hydraulic water pressure, finite element method, seismic intensity of more than 8 points, reinforcement with composite rebar, and pre-stressing

**FOR CITATION:** Almasri A. Results of computational studies of the riverbed structures of a hydroelectric power stations under seismic loads. *Construction: Science and Education*. 2026; 16(1):2. URL: <http://nso-journal.ru>. DOI: 10.22227/2305-5502.2026.1.2

*Corresponding author:* Amer Almasri, [ameralmasri3522@gmail.com](mailto:ameralmasri3522@gmail.com), [lisichkin1989@rambler.ru](mailto:lisichkin1989@rambler.ru).

## ВВЕДЕНИЕ

Многие гидроэлектростанции (ГЭС) расположены в русле реки [1–4] и воспринимают гидравлический напор воды. К таким ГЭС относятся Тишрин и Аль-Баас, построенные в Сирии [5].

Указанные здания ГЭС включают бычки, напорные стены с перекрытиями машзалов, фундаментную плиту и другие железобетонные конструкции. Они воспринимают гидравлическое давление воды верхнего бьефа и передают усилия дальше на перекрытия и другие конструкции зданий ГЭС.

В ходе многолетней эксплуатации в русловых напорных зданиях ГЭС появляются отклонения от проектных предпосылок, которые влияют на понижение эксплуатационных свойств железобетонных конструкций.

Следует отметить, что русловые ГЭС, находящиеся в Сирии, были запроектированы в соответствии с советскими нормативными документами, включая СНиП II-56–77, примерно полвека назад.

В период проектирования данных гидроузлов сейсмические воздействия и категории районов строительства определялись с использованием карт общего сейсмического районирования (ОСР), согласно СНиП II-A.12–62 и СНиП II-7–81\*, а расчеты проводились на основе линейно-спектральной теории. В настоящее время действуют новые нормативные документы, такие как СП 14.13330.2018, включающий в себя ОСР-2015, в рамках которых расчеты ги-

дротехнических сооружений I и II классов требуется проводить на основе динамической теории с применением акселерограмм.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

За многолетний период эксплуатации железобетонных зданий ГЭС Тишрин и Аль-Баас произошли изменения действующих нагрузок, физико-механических свойств материалов сооружений и основания, в том числе интенсивности сейсмических воздействий, а также изменения положений нормативных документов. В этой связи потребовалось выполнить расчеты с учетом представленных изменений.

Расчеты осуществляются методом конечных элементов с разработкой объемной математической численной модели. На основе полученных результатов поверочных расчетов может возникнуть необходимость усиления железобетонных конструкций русловых напорных зданий ГЭС (например, предварительно напряженной композитной арматурой).

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Гидроэлектростанция Тишрин (генеральный проектировщик — Институт Гидропроект) — вторая по мощности ГЭС в Сирии после электростанции Табка, она расположена на р. Евфрат, выше по течению от водохранилища Эль-Ассад.

Вид руслового напорного здания ГЭС Тишрин представлен на рис. 1.



Рис. 1. Русловое здание ГЭС Тишрин

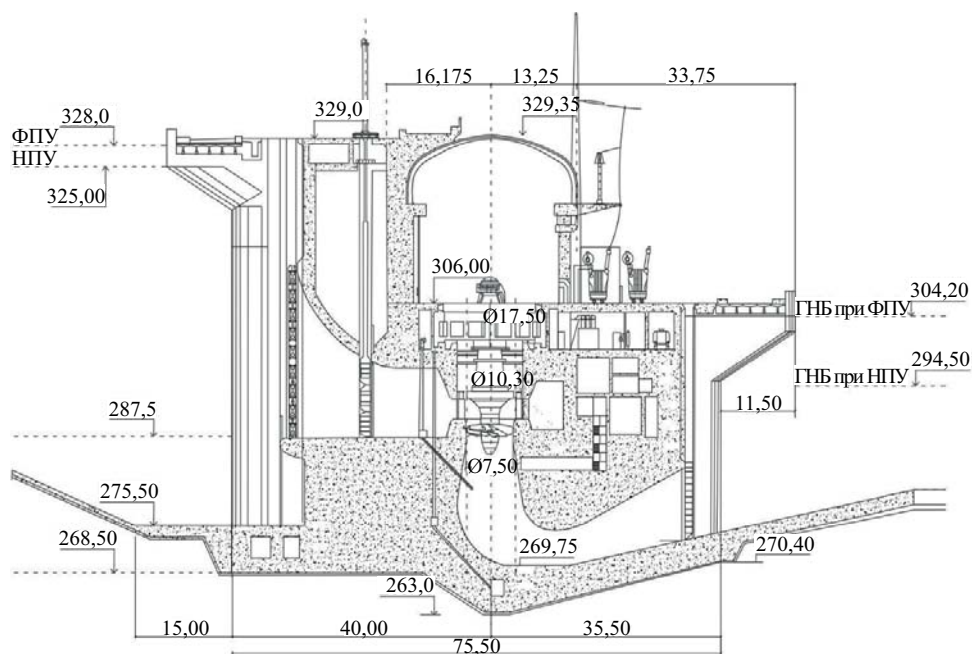


Рис. 2. Русловое здание ГЭС Тишрин в вертикальном разрезе вдоль потока

ГЭС Тишрин находится в русле р. Евфрат, имеет расчетный напор 49,5 м.

В здание ГЭС Тишрин входят три секции, которые отделены друг от друга деформационными швами. При этом каждая секция включает два гидроагрегата (итого 630 МВт мощности при эксплуатации шести гидроагрегатов).

Русловое напорное здание ГЭС Тишрин в вертикальном разрезе вдоль потока изображено на рис. 2.

В ходе исследований проведен анализ выполненных в рамках проекта расчетов прочности и устойчивости данного сооружения, которые отвечали положениям действовавших норм проектирования.

ГЭС Аль-Баас размещается в провинции Ракка, в 22 км вверх по течению от г. Ракка (генеральный проектировщик — Институт Гидропроект). Русловая ГЭС Аль-Баас несовмещенного типа с макси-

мальным напором 23,45 м (рис. 3) имеет мощность 81 МВт (включая 3 горизонтальных капсульных гидроагрегата) и предназначена для работы в качестве контррегулятора ГЭС Табка, расположенной на 18 км выше по течению.

Вертикальный разрез руслового напорного здания ГЭС Аль-Баас показан на рис. 4.

Выполнен анализ расчетов прочности и устойчивости здания ГЭС Аль-Баас в рамках проекта. Полученные результаты удовлетворяли требованиям расчета прочности и устойчивости действовавших в тот период нормативных документов.

Анализ осуществленных в рамках проекта расчетов прочности и устойчивости зданий ГЭС Тишрин и Аль-Баас показал, что они были проведены упрощенно (с использованием устаревших расчетных программ) на базе плоских и плоско-приведенных



Рис. 3. Вид руслового напорного здания ГЭС Аль-Баас

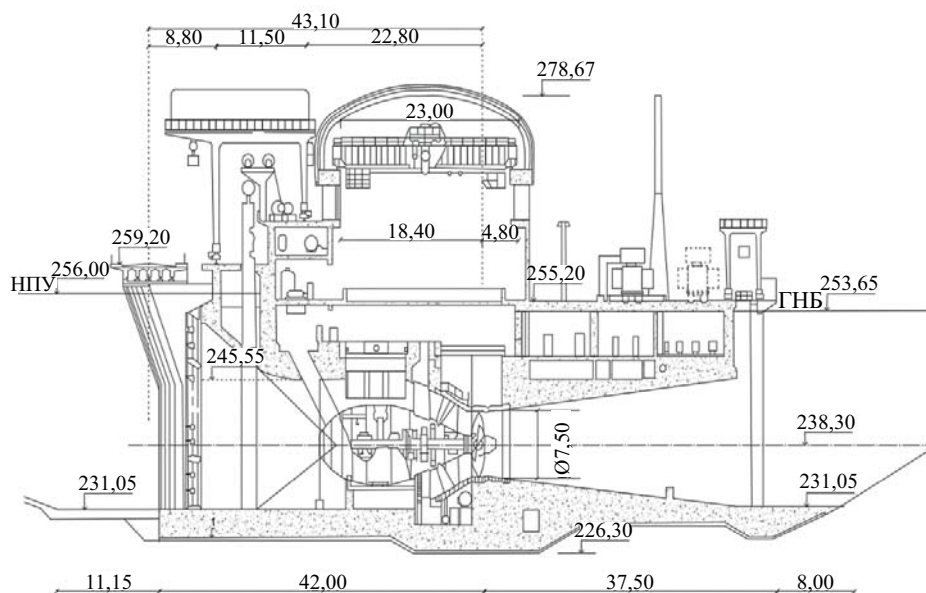


Рис. 4. Здание ГЭС Аль-Баас в вертикальном разрезе вдоль потока

конечно-элементных моделей наиболее характерных сечений зданий ГЭС Тишрин и Аль-Баас без учета раскрытия межблочных строительных швов, раскрытия контакта между подошвой здания ГЭС и основанием, комплекса действующих нагрузок и др.

Потребовалось выполнение расчетов напряженно-деформированного состояния (НДС), прочности и устойчивости русловых напорных зданий ГЭС Тишрин и Аль-Баас в рамках современных про-

граммных комплексов на основе объемных математических численных моделей.

Пространственная конечно-элементная модель блока здания ГЭС Тишрин приведена на рис. 5.

В результате расчетных исследований было получено НДС в различные периоды времени (в секундах), отсчитывая от начала сейсмического воздействия.

На рис. 6 представлено напряженное состояние в конструкциях здания ГЭС Тишрин при действии

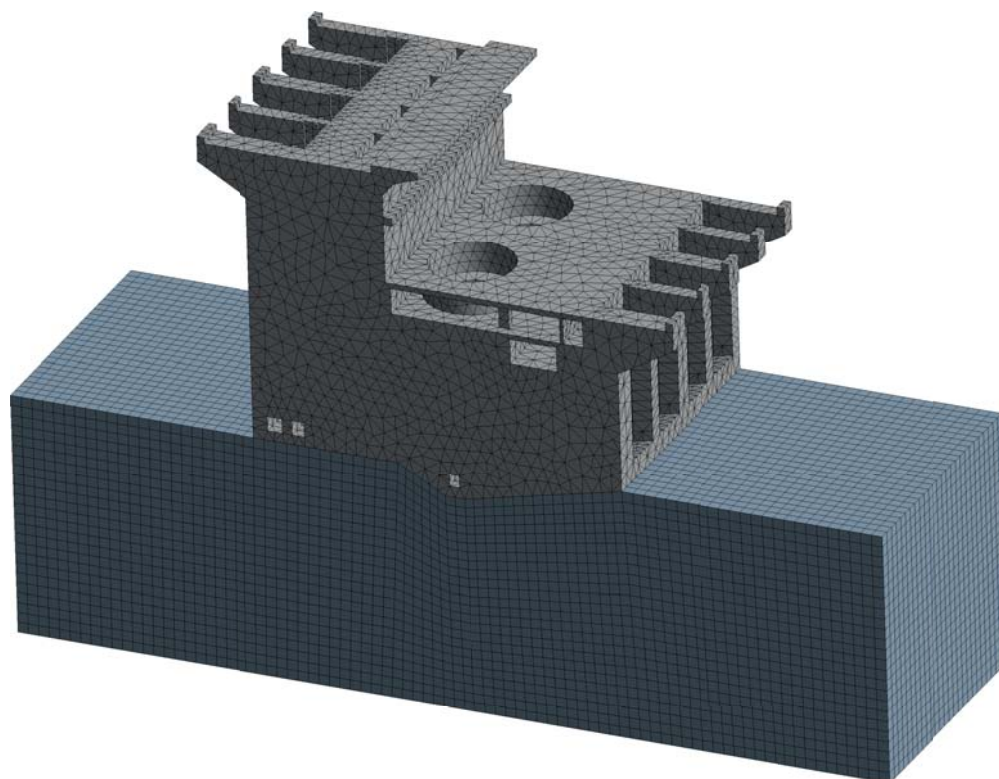
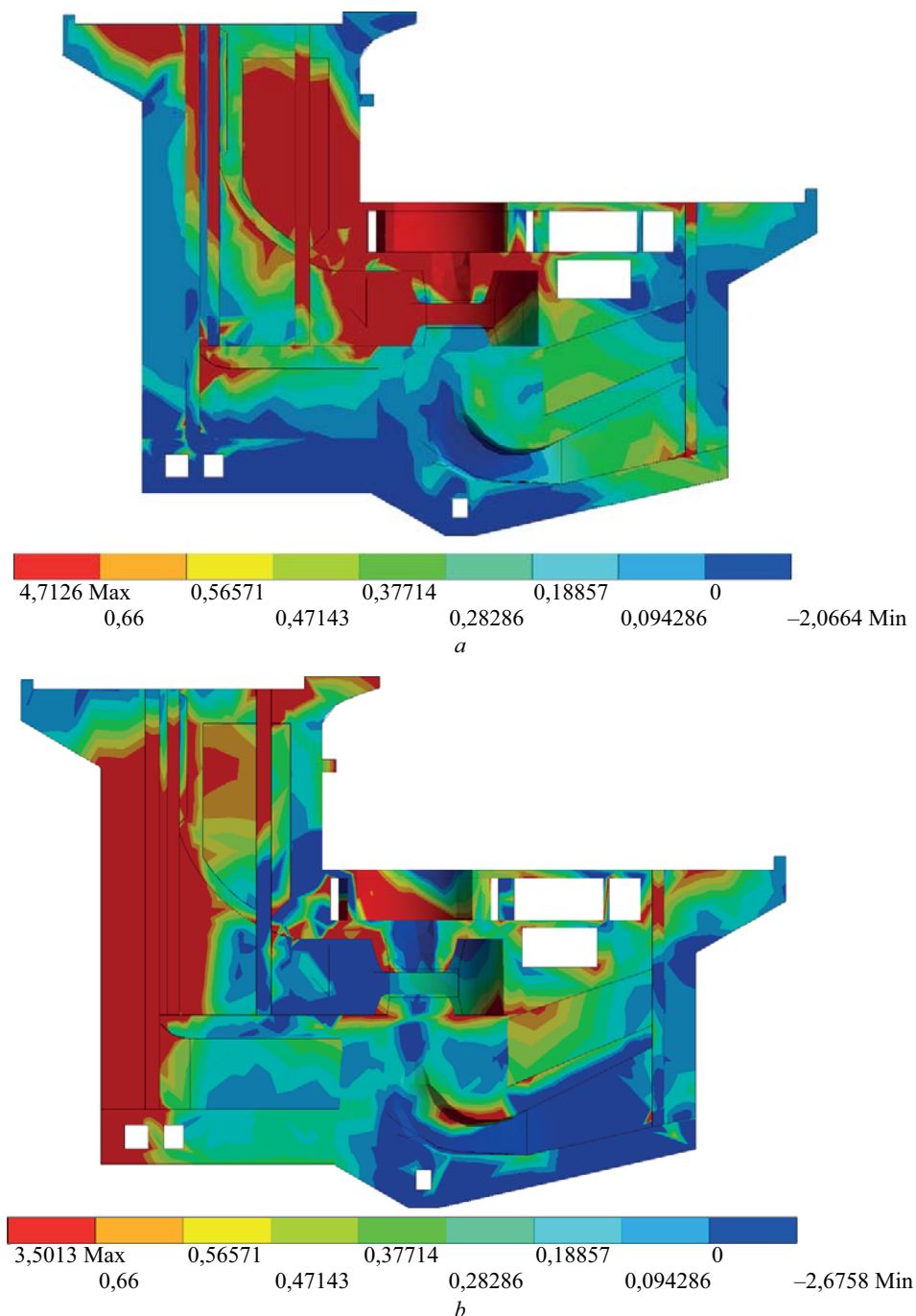


Рис. 5. Пространственная конечно-элементная модель блока здания ГЭС Тишрин с основанием



**Рис. 6.** Максимальные главные напряжения: *a* — в верховой напорной стене здания ГЭС Тишрин, МПа, при сейсмическом воздействии (в период времени 2,62 с от начала сейсмического воздействия); *b* — в бычках здания ГЭС Тишрин, МПа, при сейсмическом воздействии (в период времени 4,94 с от начала сейсмического воздействия)

статических нагрузок и сейсмических воздействий на основе динамической теории расчета в периоды времени 2,62 и 4,94 с от начала сейсмического воздействия.

В течение процесса сейсмического воздействия происходит перераспределение действующих усилий и соответственно напряженного состояния. Так, в период времени 2,62 с от начала сейсмического воздействия наибольшие растягивающие напряжения (до 4,7 МПа) возникают в верховой напорной стене здания ГЭС (рис. 6, *a*).

В период 4,94 с от начала сейсмического воздействия наибольшие растягивающие напряжения (до 3,5 МПа) появляются в бычках здания ГЭС (рис. 6, *b*).

Отмечаются (рис. 6) растягивающие напряжения, большие, чем прочность бетона при растяжении, под действием которых могут раскрываться межблочные строительные швы и образовываться трещины в монолите.

Раскрытие контакта между подошвой здания ГЭС и основанием со стороны верхнего бьефа через

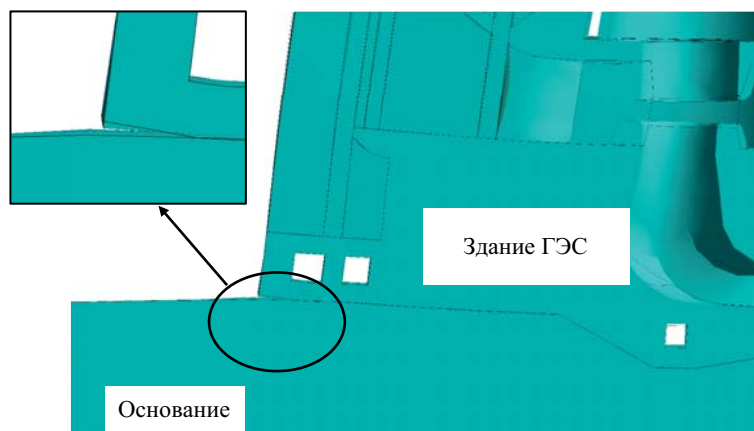


Рис. 7. Раскрытие контакта между подошвой здания ГЭС и основанием с верховой стороны при сейсмическом воздействии в период времени 4,94 с от начала сейсмического воздействия

4,94 с от начала сейсмического воздействия показано на рис. 7.

Представленные результаты выполненных расчетов здания ГЭС Тишрин свидетельствуют о необходимости усиления железобетонных конструкций, в том числе для повышения устойчивости. Примеры усиления приведены в литературных источниках [6–12].

При этом усиление железобетонных сооружений и конструкций широко изучается различными учеными с учетом того, что распространение получили композитные материалы, позволяющие обеспечить требуемые запасы несущей способности практически без изменения их массогабаритных размеров [13–22].

Представляется целесообразным использовать предварительно напряженную композитную арматуру, в том числе с учетом данных отечественных исследований [23–28].

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Важно отметить, что проектные решения русловых ГЭС, находящихся в Сирии, были обоснованы в соответствии с российскими нормативными доку-

ментами примерно полвека назад. В то время действовали соответствующие нормативные документы, которые не всегда полностью учитывали особенности массивных железобетонных гидротехнических конструкций, к примеру СНиП II-56–77.

В настоящее время наблюдается увеличение сейсмической активности в некоторых районах в соответствии с актуальным СП 14.13330.2018, содержащим ОСР-2015.

При этом в СП 14.13330.2018 появились требования о необходимости проведения расчетов гидротехнических сооружений I и II классов на основе динамической теории с применением акселерограмм (в отличие от линейно-спектральной теории).

В результате сказанного выше существующие длительно эксплуатируемые сооружения не обеспечивают сейсмостойкости в соответствии с действующей нормативной документацией. Поэтому возникает необходимость усиления железобетонных конструкций длительно эксплуатируемых русловых напорных зданий ГЭС, при этом целесообразно применение композитных материалов, в том числе предварительно напряженной композитной арматуры [13–28].

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Raja A.K., Srivastava P.A., Dwivedi M. Power Plant Engineering. New Delhi, New Age International, 2006. 354 p.
2. Lenkov A.Y., Fisenko V.F. Experience gained from operation of the hydraulic structures of the Votkinsk hydroelectric power plant // Power Technology and Engineering. 2017. Vol. 51. Issue 1. Pp. 33–39. DOI: 10.1007/s10749-017-0779-y. EDN XNDQPU.
3. 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. Vol. 52. Issue 2. Pp. 181–184. DOI: 10.1007/s10749-018-0929-x. EDN YBPZOH.
4. Rodrigues R.V. Structural Design of a Surface HydroPower Plant. Lisbon : Technical University of Lisbon, 2014. Pp. 1–9.
5. Rubin O.D., Lisichkin S.E., Bakliukov 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 // AIP Conference Proceedings. 2025. Vol. 3286. P. 040003. DOI: 10.1063/5.0279432
6. Басевич А.З. Восстановление массивности и прочности бетонных гидротехнических сооружений // Известия ВНИИГ. 1948. Т. 35. С. 141–156.
7. Rubin O.D., Kozlov D.V., Antonov A.S., Almasri A., Zhang J. Design and experimental studies of strengthening

- of backwater type hydraulic structures with composite materials // *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*. 2024. Vol. 20. Issue 4. Pp. 119–140. DOI: 10.22337/2587-9618-2024-20-4-119-140
8. Рубин О.Д., Умнова Р.В., Ну В.Е. Анализ работы и усиления доковых стен шлюзов // *Гидротехническое строительство*. 1988. № 8. С. 47–49.
  9. Левачев С.Н., Мельник Г.В., Даревский В.Э., Федорова Т.С. Напряженно-деформированное состояние стен камеры шлюза № 2 канала им. Москвы // *Гидротехника*. 2012. № 4 (29). С. 85–90.
  10. Левачев С.Н., Федорова Т.С. Напряженно-деформированное состояние бетона стен камер шлюзов канала имени Москвы // *Вестник МГСУ*. 2013. № 8. С. 137–149. EDN RAFVNN.
  11. Левачев С.Н., Федорова Т.С. Развитие системы мониторинга безопасности на гидротехнических сооружениях канала имени Москвы // *Вестник МГСУ*. 2015. № 5. С. 73–85. EDN RTCLHW.
  12. Тернавский С.В., Жуков В.Н., Зальцман Ю.О., Любомиров А.А. Усиление стен шлюза № 8 канала имени Москвы предварительно-напряженными анкерами // *Гидротехническое строительство*. 1996. № 11. С. 8–15.
  13. Zaki M., Tobaa A., Shehata A., Mohamed F., Khalef R., Hagraas Y. et al. Potential advantages of basalt FRP bars compared to carbon FRP bars & conventional steel // *Australian Journal of Civil Engineering*. 2020. Vol. 19. Issue 1. Pp. 107–122. DOI: 10.1080/14488353.2020.1816638
  14. Subramanian N. Sustainability of RCC Structures using Basalt Composite Rebars. *The Masterbuilder*. 2010. Pp. 156–164.
  15. Elamathi E., Priyanka R., Sangeetha V. Flexural Study on Basalt Rebar Reinforced Concrete Beams // *Journal of Engineering*. 2018. Vol. 8. Issue 1. Pp. 1–5.
  16. Elgabbas F., Ahmed E.A., Benmokrane B. Flexural Behavior of Concrete Beams Reinforced with Ribbed Basalt-FRP Bars under Static Loads // *Journal of Composites for Construction*. 2017. Vol. 21. Issue 3. DOI: 10.1061/(asce)cc.1943-5614.0000752
  17. Tharanitharan G., Ibrahim M.A., Issa M.A. Serviceability and Ultimate Load Behavior of Concrete Beams Reinforced with Basalt Fiber-Reinforced Polymer Bars // *ACI Structural Journal*. 2016. Vol. 113. Issue 4. Pp. 757–768. DOI: 10.14359/51688752
  18. Pavlović A., Donchev T., Petkova D., Limbachiya M., Almuhausen R. Pretensioned BFRP reinforced concrete beams: Flexural behaviour and estimation of initial prestress losses // *MATEC Web of Conferences*. 2019. Vol. 289. P. 09001. DOI: 10.1051/mateconf/201928909001
  19. Sokairge H., Elgabbas F., Elshafie N. Structural behavior of RC beams strengthened with prestressed near surface mounted technique using basalt FRP bars // *Engineering Structures*. 2022. Vol. 250. P. 113489. DOI: 10.1016/j.engstruct.2021.113489
  20. Thorhallsson E.R., Zhelyazov T., Gunnarsson A., Snaebjornsson J.T. Concrete beams reinforced with prestressed basalt bars // *Concrete-Innovation and Design, fib Symposium*. 2015.
  21. Thorhallsson E.R., Gunnarsson A., Snaebjornsson J.T. Simulation of Experimental Research of Concrete Beams Prestressed with BFRP Tendons // *Nordic Concrete Research Symposium*. 2014.
  22. Thorhallsson E.R., Gudmundsson S.H. Test of prestressed basalt FRP concrete beams with and without external stirrups // *Proceedings from fib Symposium*. 2013. Pp. 393–396
  23. Рубин О.Д., Лисичкин С.Е., Зюзина О.В. Влияние базальтокомпозитной предварительно напряженной арматуры на работу малоармированных железобетонных конструкций с межблочными строительными швами // *Природообустройство*. 2020. № 5. С. 50–58. DOI: 10.26897/1997-6011/2020-5-50-59. EDN ЕККАФС.
  24. Зюзина О.В. Экспериментальные исследования железобетонных конструкций гидротехнических сооружений, усиленных предварительно напряженной поперечной арматурой // *Строительная механика инженерных конструкций и сооружений*. 2020. Т. 16. № 6. С. 504–512. DOI: 10.22363/1815-5235-2020-16-6-504-512. EDN АЕНППФ.
  25. Беллендир Е.Н., Рубин О.Д., Лисичкин С.Е., Зюзина О.В. Экспериментальные исследования потерь предварительного напряжения базальтокомпозитной арматуры в составе бетонного элемента // *Гидротехническое строительство*. 2020. № 7. С. 2–6. EDN ВЗЕИЗФ.
  26. Зюзина О.В., Беллендир Е.Н. Экспериментальные исследования железобетонных конструкций гидротехнических сооружений с межблочными швами, усиленных предварительно-напряженной базальтокомпозитной арматурой // *Гидротехническое строительство*. 2021. № 2. С. 41–47. EDN LCFFYH.
  27. 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. С. 53–62. DOI: 10.26897/1997-6011-2021-1-53-62. EDN ЗНАУМН.
  28. Зюзина О.В., Беллендир Е.Н., Рубин О.Д. Усиление железобетонных конструкций эксплуатируемых гидротехнических сооружений предварительно напряженной базальтокомпозитной арматурой // *Сб. тез. докл. IV Всеросс. науч.-практ. семинара*. 2021. С. 35.

Поступила в редакцию 20 июля 2025 г.

Принята в доработанном виде 5 октября 2025 г.

Одобрена для публикации 8 октября 2025 г.

ОБ АВТОРЕ: **Амер Алмасри** — аспирант кафедры гидравлики и гидротехнического строительства; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; SPIN-код: 2354-4836, ORCID: 0009-0007-4090-4353; ameralmasri3522@gmail.com.

## INTRODUCTION

Many hydroelectric power plants (HPP) are situated within the river channel [1–4] and utilize the hydraulic head of the water. Examples of such HPP include the Tishrin and Al-Baas stations, built in Syria [5].

These HPP structures include spillways, intake beams, head walls with turbine hall floors, foundation slabs and other reinforced concrete structures. They bear the hydraulic pressure of the water in the upper reservoir and transfer the forces to the floors and other structures of the HPP.

During many years of operation, deviations from the design assumptions occur in the run-of-river headworks of hydroelectric power stations, which lead to a deterioration in the performance of the reinforced concrete structures.

It should be noted that the run-of-river HPP located in Syria were designed in accordance with Soviet regulatory documents, including SNiP II-56–77, approximately half a century ago.

During the design phase of these hydropower facilities, seismic effects and construction zone categories were determined using general seismic zoning (GSZ) maps, in accordance with SNiP II-A.12–62 and SNiP II-7–81\*, and calculations were carried out based on linear-spectral theory. New regulatory documents are now in force, such as CP 14.13330.2018, which incorporates

GSZ-2015, under which calculations for Class I and II hydraulic structures must be carried out on the basis of dynamic theory using accelerograms.

## MATERIALS AND METHODS

Over the many years of operation of the reinforced concrete buildings at the Tishrin and Al-Baas hydroelectric power stations, changes have occurred in the applied loads, the physical and mechanical properties of the structural materials and foundations, including the intensity of seismic effects, as well as changes in the provisions of regulatory documents. Consequently, it was necessary to carry out calculations taking these changes into account.

The calculations are carried out using the finite element method with the development of a three-dimensional mathematical numerical model. Based on the results of the verification calculations, it may be necessary to reinforce the reinforced concrete structures of the riverbed headworks of the hydroelectric power stations (for example, with prestressed composite reinforcement).

## RESEARCH RESULTS

The Tishrin HPP (lead designer: the Hydroproject Institute) is the second-largest hydroelectric power station in Syria after the Tabqa Power Station; it is situated



Fig. 1. The riverbed structure of the Tishrin HPP

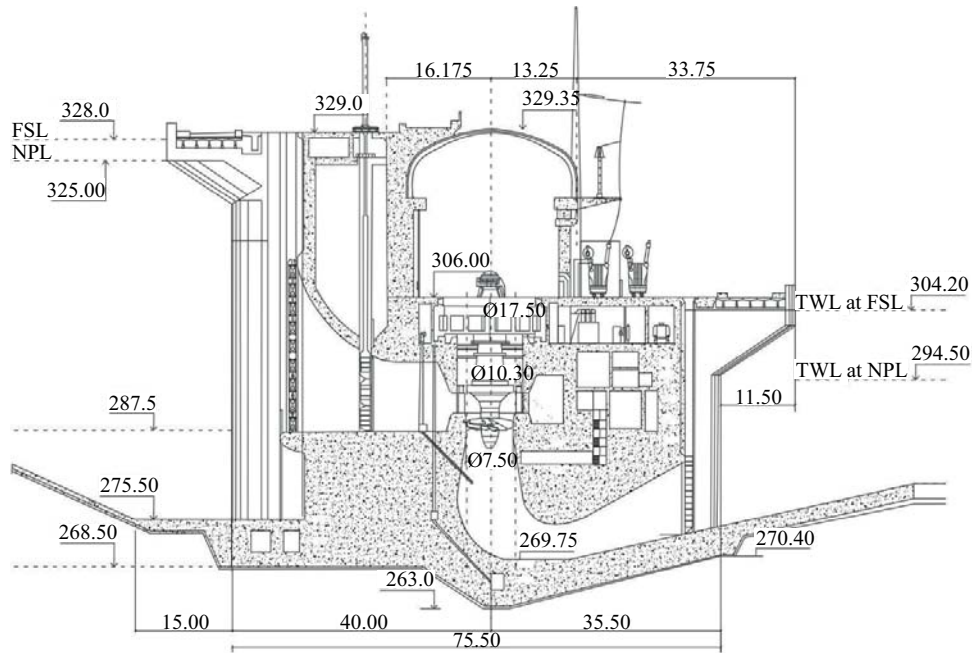


Fig. 2. Vertical cross-section of the Tishrin HPP's riverbed structure along the flow

on the Euphrates River, upstream of the El-Assad Reservoir.

A view of the Tishrin HPP riverbed headworks is shown in Fig. 1.

The Tishrin HPP is located on the Euphrates River and has a design head of 49.5 m.

The Tishrin HPP comprises three sections, separated from one another by expansion joints. Each section contains two turbine units (giving a total capacity of 630 MW when all six units are in operation).

A vertical cross-section of the Tishrin HPP's riverbed headrace building along the flow is shown in Fig. 2.

The research involved an analysis of the structural strength and stability calculations carried out for this facility as part of the project, which complied with the provisions of the design standards in force at the time.

The Al-Baas HPP is located in the province of Raqqa, 22 km upstream from the city of Raqqa (lead designer: the Hydroproject Institute). The Al-Baas run-of-river HPP, of the non-combined type with a maximum head of 23.45 m (Fig. 3), has a capacity of 81 MW (including three horizontal capsule-type hydroelectric units) and is designed to operate as a counter-regulator for the Tabqa HPP, located 18 km further upstream.

A vertical section of the Al-Baas hydroelectric power station's riverbed pressure chamber is shown in Fig. 4.

An analysis of the structural strength and stability calculations for the Al-Baas hydroelectric power station building was carried out as part of the project. The results obtained met the requirements for structural strength and stability set out in the regulatory documents in force at that time.



Fig. 3. View of the riverbed pressure structure at the Al-Baas HPP

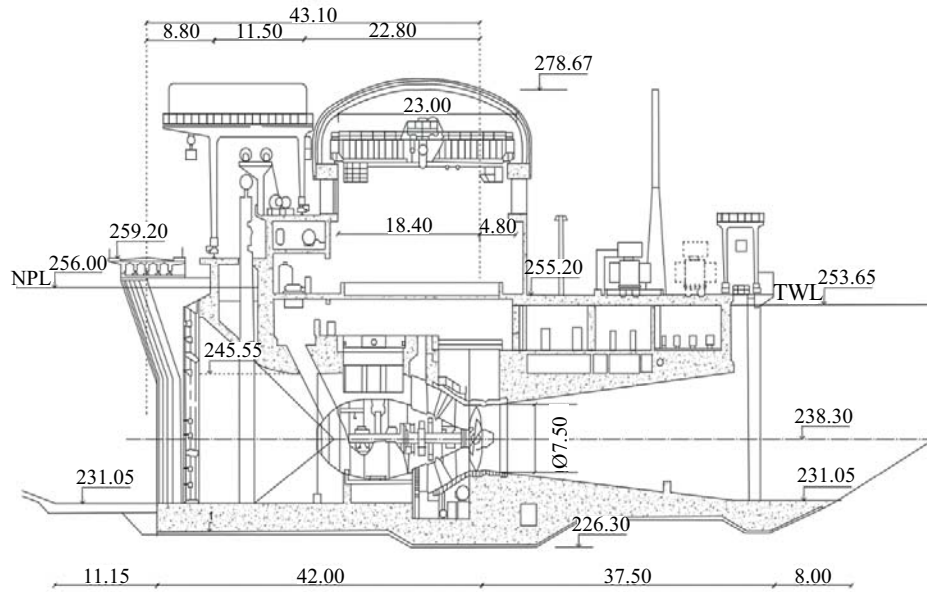


Fig. 4. Vertical cross-section of the Al-Baas HPP along the flow

An analysis of the strength and stability calculations carried out as part of the project for the Tishrin and Al-Baas HPP buildings showed that they were performed in a simplified manner (using outdated calculation software) based on plane and plane-equivalent finite element models of the most characteristic cross-sections of the Tishrin and Al-Baas HPP structures, without taking into account the opening of inter-block construction joints, the contact between the base of the HPP structure and the foundation, the complex of applied loads, etc.

It was necessary to perform stress-strain state (SSS), strength and stability analyses of the Tishrin and Al-Baas HPP riverbed pressure structures using modern software packages based on three-dimensional mathematical numerical models.

A spatial finite-element model of a section of the Tishrin HPP structure is shown in Fig. 5.

The computational studies yielded the stress-strain state at various time intervals (in seconds), measured from the onset of the seismic excitation.

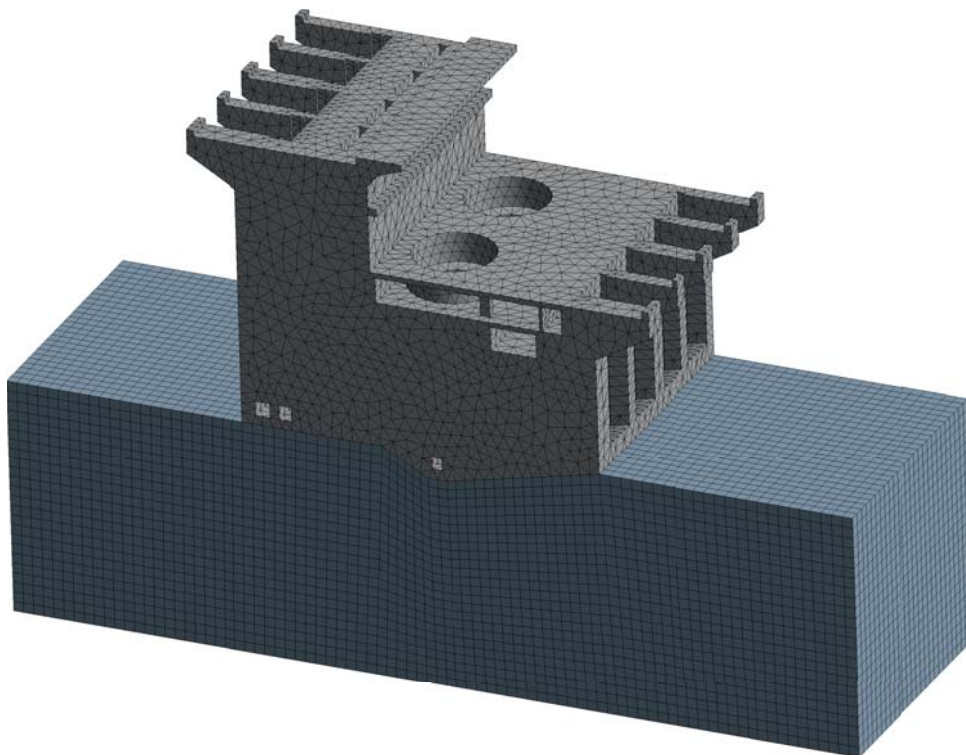
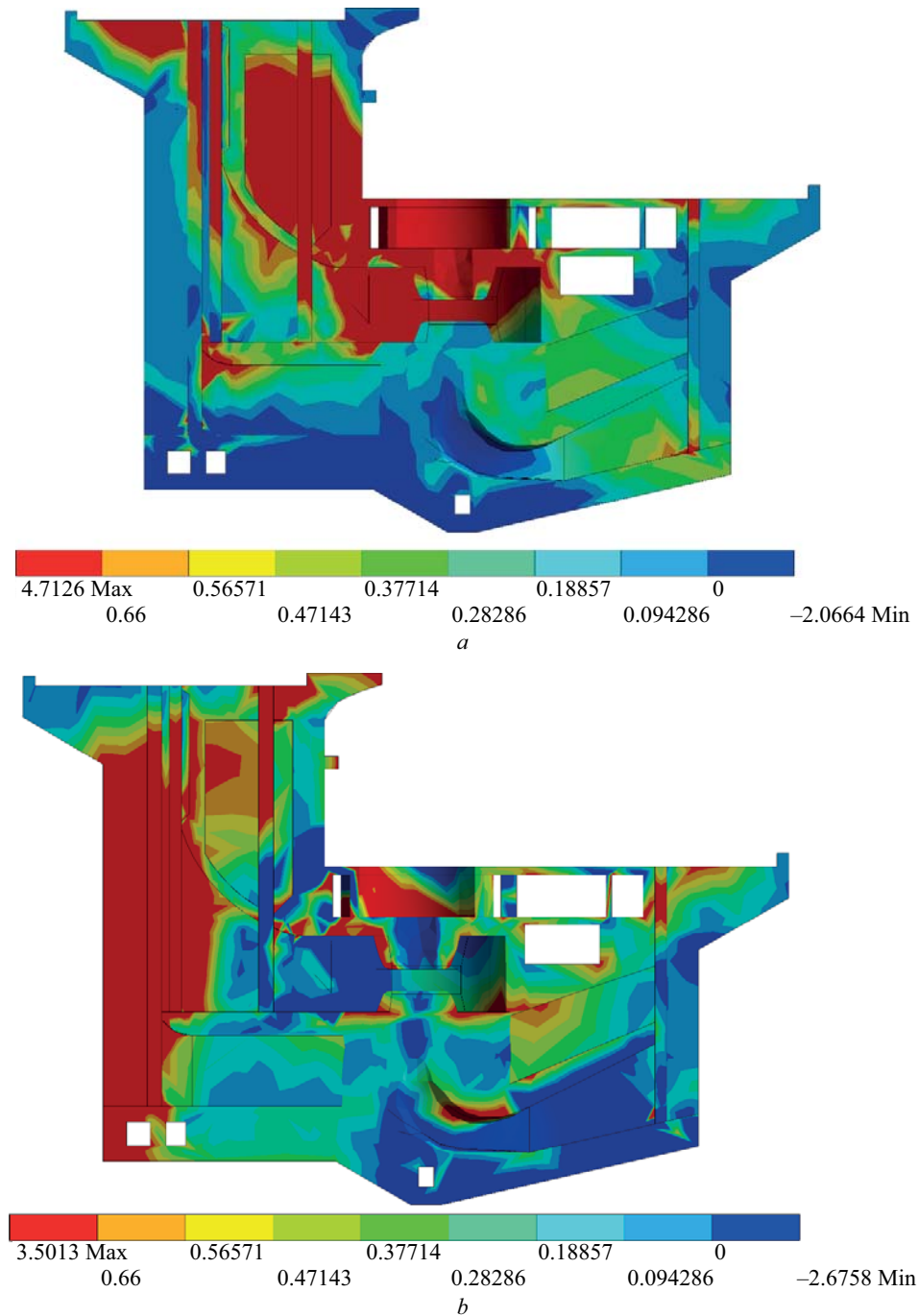


Fig. 5. Spatial finite-element model of a building block at the Tishrin HPP, including the foundation



**Fig. 6.** Maximum principal stresses: *a* — in the upstream retaining wall of the Tishrin HPP building, MPa, under seismic loading (at 2.62 s after the onset of seismic loading); *b* — in the buttresses of the Tishrin HPP building, MPa, under seismic loading (at 4.94 s from the start of the seismic loading)

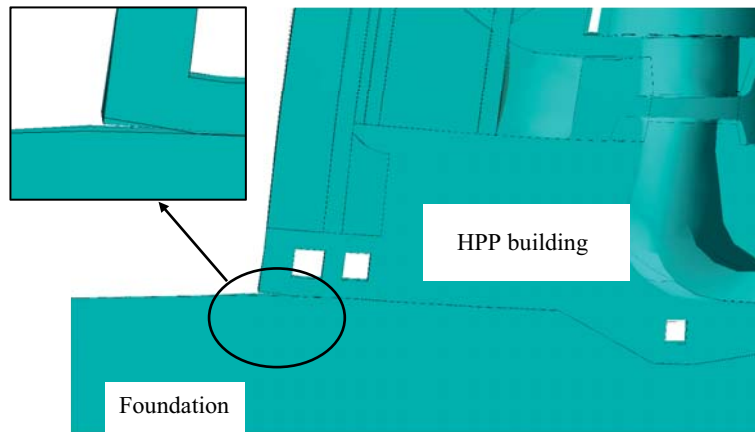
Fig. 6 shows the stress state in the structures of the Tishrin HPP building under static loads and seismic effects, based on dynamic calculation theory, at time intervals of 2.62 and 4.94 s from the start of the seismic event.

During the seismic event, there is a redistribution of the applied forces and, consequently, of the stress state. Thus, at 2.62 seconds from the start of the seismic event, the highest tensile stresses (up to 4.7 MPa) occur in the upper pressure wall of the hydroelectric power station building (Fig. 6, *a*).

At 4.94 seconds from the start of the seismic excitation, the highest tensile stresses (up to 3.5 MPa) appear in the buttresses of the HPP building (Fig. 6, *b*).

Tensile stresses greater than the tensile strength of the concrete are observed (Fig. 6); under the influence of these stresses, the construction joints between blocks may open up and cracks may form in the monolithic structure.

The separation of contact between the base of the HPP building and the foundation on the upstream side 4.94 seconds after the start of the seismic impact is shown in Fig. 7.



**Fig. 7.** Separation of the contact between the base of the HPP building and the foundation on the upstream side under seismic loading, 4.94 seconds after the onset of the seismic loading

The results of the calculations carried out for the Tishrin HPP indicate the need to reinforce the reinforced concrete structures, including to improve their stability. Examples of such reinforcement are given in the literature [6–12].

At the same time, the reinforcement of reinforced concrete structures and frameworks is being extensively studied by various researchers, given the widespread use of composite materials, which allow the required load-bearing capacity to be achieved with virtually no change to their mass and dimensions [13–22].

It appears appropriate to use prestressed composite reinforcement, taking into account the findings of domestic research [23–28].

## CONCLUSION AND DISCUSSION

It is important to note that the design solutions for run-of-river hydropower plants located in Syria were justified in accordance with Russian regulatory docu-

ments approximately half a century ago. At that time, relevant regulatory documents were in force which did not always fully take into account the specific features of massive reinforced concrete hydraulic structures, for example SNiP II-56–77.

Currently, there is an increase in seismic activity in some areas in accordance with the current CP 14.13330.2018, which incorporates GSZ-2015.

At the same time, CP 14.13330.2018 introduced requirements for the calculation of Class I and II hydraulic structures based on dynamic theory using accelerograms (as opposed to linear-spectral theory).

As a result of the above, existing structures that have been in service for a long time do not ensure seismic resistance in accordance with current regulatory documentation. Therefore, there is a need to reinforce the reinforced concrete structures of long-serving riverbed headworks at HPP; in this context, the use of composite materials, including prestressed composite reinforcement, is advisable [13–28].

## REFERENCES

1. Raja A.K., Srivastava P.A., Dwivedi M. *Power Plant Engineering*. New Delhi, New Age International, 2006; 354.
2. Lenkov A.Y., 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. DOI: 10.1007/s10749-017-0779-y. EDN XNDQPU.
3. 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. DOI: 10.1007/s10749-018-0929-x. EDN YBPZOH.
4. Rodrigues R.V. *Structural Design of a Surface HydroPower Plant*. Lisbon, Technical University of Lisbon, 2014; 1-9.
5. Rubin O.D., Lisichkin S.E., Bakliukov 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. *AIP Conference Proceedings*. 2025; 3286:040003. DOI: 10.1063/5.0279432
6. Basevich A.Z. Restoration of massiveness and strength of concrete hydraulic structures. *Proceedings of the VNIIG*. 1948; 35:141-156. (rus.).
7. Rubin O.D., Kozlov D.V., Antonov A.S., Almasri A., Zhang J. Design and experimental studies of strengthening of backwater type hydraulic structures with composite materials. *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*. 2024; 20(4):119-140. DOI: 10.22337/2587-9618-2024-20-4-119-140

8. Rubin O.D., Umnova R.V., Ni V.E. Analysis of the work and strengthening of dock walls of gateways. *Hydrotechnical construction*. 1988; (8):47-49. (rus.).
9. Levachev L.S., Mel'nik G. V., Darevskii V.E., Fedorova T.S. Stress-strain state of the walls of the chamber of lock No. 2 of the Moscow Canal. *Gidrotekhnika*. 2012; 4(29):85-91. (rus.).
10. Levachev S.N., Fedorova T.Ya. S. Stress-strain state of concrete in the walls of lock chambers of the Moscow channel. *Vestnik MGSU* [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]. 2013; 8:137-149. EDN RAFVNN. (rus.).
11. Levachev S.N., Fedorova T.S. Development of the safety monitoring system of hydraulic structures of the Moscow canal. *Vestnik MGSU* [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]. 2015; 5:73-85. EDN RTCLHW. (rus.).
12. Ternavsky S.V., Zhukov V.N., Zaltsman Yu.O., Lyubomirov A.A. Strengthening of the wall of lock No. 8 of the Moscow Canal with prestressed anchors. *Hydrotechnical Construction*. 1996; (11):8-15. (rus.).
13. Zaki M., Tobaa A., Shehata A., Mohamed F., Khalef R., Hagra Y. et al. Potential advantages of basalt FRP bars compared to carbon FRP bars & conventional steel. *Australian Journal of Civil Engineering*. 2020; 19(1):107-122. DOI: 10.1080/14488353.2020.1816638
14. Subramanian N. Sustainability of RCC Structures using Basalt Composite Rebars. *The Masterbuilder*. 2010; 156-164.
15. Elamathi E., Priyanka R., Sangeetha V. Flexural Study on Basalt Rebar Reinforced Concrete Beams. *Journal of Engineering*. 2018; 8(1):1-5.
16. Elgabbas F., Ahmed E.A., Benmokrane B. Flexural Behavior of Concrete Beams Reinforced with Ribbed Basalt-FRP Bars under Static Loads. *Journal of Composites for Construction*. 2017; 21(3). DOI: 10.1061/(asce)cc.1943-5614.0000752
17. Tharanitharan G., Ibrahim M.A., Issa M.A. Serviceability and Ultimate Load Behavior of Concrete Beams Reinforced with Basalt Fiber-Reinforced Polymer Bars. *ACI Structural Journal*. 2016; 113(4):757-768. DOI: 10.14359/51688752
18. Pavlović A., Donchev T., Petkova D., Limbachiya M., Almuhausen R. Pretensioned BFRP reinforced concrete beams: Flexural behaviour and estimation of initial prestress losses. *MATEC Web of Conferences*. 2019; 289:09001. DOI: 10.1051/mateconf/201928909001
19. Sokairge H., Elgabbas F., Elshafie N. Structural behavior of RC beams strengthened with prestressed near surface mounted technique using basalt FRP bars. *Engineering Structures*. 2022; 250:113489. DOI: 10.1016/j.engstruct.2021.113489
20. Thorhallsson E.R., Zhelyazov T., Gunnarsson A., Snaebjornsson J.T. Concrete beams reinforced with prestressed basalt bars. *Concrete-Innovation and Design, fib Symposium*. 2015.
21. Thorhallsson E.R., Gunnarsson A., Snaebjornsson J.T. Simulation of Experimental Research of Concrete Beams Prestressed with BFRP Tendons. *Nordic Concrete Research Symposium*. 2014.
22. Thorhallsson E.R., Gudmundsson S.H. Test of prestressed basalt FRP concrete beams with and without external stirrups. *Proceedings from fib Symposium*. 2013; 393-396.
23. Rubin O.D., Lisichkin S.E., Zyuzina O.V. The influence of basalt-composite prestressed reinforcement on the operation of low-reinforced concrete structures with interblock construction joints. *Prirodobustrojstvo*. 2020; 5:50-58. DOI: 10.26897/1997-6011/2020-5-50-59. EDN EKKAF. (rus.).
24. Zyuzina O.V. Experimental studies of reinforced concrete structures of hydraulic structures strengthened with prestressed transverse reinforcement. *Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings*. 2020; 16(6):504-512. DOI: 10.22363/1815-5235-2020-16-6-504-512. EDN AENPPF. (rus.).
25. Bellendir E.N., Rubin O.D., Lisichkin S.E., Zyuzina O.V. Experimental studies of pre-stress losses of basalt composite reinforcement as part of a concrete element. *Power Technology and Engineering*. 2020; 7: 2-6. EDN BZEIZF. (rus.).
26. Zyuzina O.V., Bellendir E.N. Experimental studies of reinforced concrete structures of hydraulic engineering constructions with interlocking seams reinforced with prestressed basalt composite rebar. *Power Technology and Engineering*. 2021; 2:41-47. EDN LCFFYH. (rus.).
27. Rubin O.D., Lisichkin S.E., Zyuzina O.V. Strength of low-reinforced concrete structures with the interblock construction joints reinforced by prestressed basalt-composite bars. *Prirodobustrojstvo*. 2021; 1:53-62. DOI: 10.26897/1997-6011-2021-1-53-62. EDN ZHAYMH. (rus.).
28. Zyuzina O.V., Bellendir E.N., Rubin O.D. Strengthening of reinforced concrete structures of operating hydraulic structures with prestressed basalt-composite reinforcement. *Collection of abstracts of the IV All-Russian Scientific and Practical Seminar*. 2021; 35. (rus.).

Received July 20, 2025.

Adopted in revised form on October 5, 2025.

Approved for publication on October 8, 2025.

**BIONOTES:** Amer Almasri — postgraduate student of the Department of Hydraulics and Hydraulic Engineering; Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU); 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; SPIN-code: 2354-4836, ORCID: 0009-0007-4090-4353; ameralmasri3522@gmail.com.