

Расчетные и экспериментальные исследования железобетонных русловых зданий гидроэлектростанций и напорных зданий гидроаккумулирующих электростанций

Цзюньхао Чжан

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

АННОТАЦИЯ

Введение. Напорные стены машинных залов и щитовые стены железобетонных русловых зданий гидроэлектростанций (ГЭС)/напорных зданий гидроаккумулирующих электростанций (ГАЭС) находятся под действием давления воды верхнего/нижнего бьефа, которое передается на перекрытия и другие конструкции зданий. Состояние конструкций длительно эксплуатируемых железобетонных русловых зданий ГЭС/напорных зданий ГАЭС может потребовать их усиления, к примеру внешним армированием из углеродных композитных материалов.

Материалы и методы. Установлены несущие конструкции железобетонных русловых зданий ГЭС и напорных зданий ГАЭС, состояние которых может потребовать их усиления. Проведены лабораторные испытания моделей фрагмента верхней стены машинного зала железобетонного руслового здания ГЭС в масштабе 1:15 (без усиления и с усилением углеродной композитной лентой на растянутой грани). Для расчетных исследований НДС руслового здания ГЭС/напорного здания ГАЭС используются численные конечно-элементные методы.

Результаты. Проведенные экспериментальные исследования показали существенное положительное влияние усиления внешним армированием на величины смещений верха моделей, ширины раскрытия межблочных швов, напряжений в растянутой арматуре в швах. Для расчетных исследований создана трехмерная математическая модель руслового здания ГЭС.

Выводы. Состояние конструкций длительно эксплуатируемых железобетонных русловых зданий ГЭС/напорных зданий ГАЭС может потребовать их усиления, к примеру внешним армированием из углеродных композитных материалов. С учетом результатов проведенных лабораторных исследований обоснован метод усиления конструкции верхней стены машинного зала железобетонного руслового здания ГЭС на основе углеродных композитных лент. С целью проведения расчетных исследований создана трехмерная математическая модель руслового здания ГЭС.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: русловые здания ГЭС, напорные здания ГАЭС, верховые стены машзалов, щитовые стены, строительные швы между блоками, лабораторные испытания, трехмерная математическая модель руслового здания ГЭС

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Чжан Ц. Расчетные и экспериментальные исследования железобетонных русловых зданий гидроэлектростанций и напорных зданий гидроаккумулирующих электростанций // Строительство: наука и образование. 2026. Т. 16. Вып. 1. Ст. 3. URL: <http://nso-journal.ru>. DOI: 10.22227/2305-5502.2026.1.3

Автор, ответственный за переписку: Цзюньхао Чжан, weiw0951@gmail.com, lisichkin1989@rambler.ru.

Calculative and experimental studies of reinforced concrete flood control structures and pressure structures at hydroelectric power stations

Junhao Zhang

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

ABSTRACT

Introduction. The pressure walls of the machine rooms and the shield walls of the reinforced concrete channel buildings of hydroelectric power plants/pumped-storage hydroelectric power plants are subjected to the pressure of the upper/lower water level, which is transmitted to the floors and other structures of the buildings. The condition of the structures of long-term operated reinforced concrete channel buildings of hydroelectric power plants/pumped-storage hydroelectric power plants may require their reinforcement, for example, with external reinforcement made of carbon composite materials.

Materials and methods. The load-bearing structures of the reinforced concrete channel buildings of hydroelectric power plants and pumped-storage power plants were installed, and their condition may require reinforcement. Laboratory tests

have been conducted on models of a section of the upper wall of the machine hall of a reinforced concrete channel building of a hydroelectric power plant at a scale of 1:15 (without reinforcement and with reinforcement using carbon composite tape on the stretched edge). Numerical finite element methods are used to conduct computational studies of the stress-strain state of the channel building of a hydroelectric power plant/pumped-storage power plant.

Results. The experimental studies demonstrated a significant positive effect of external reinforcement on the displacement of the top of the models, the opening width of the inter-block joints, and the stress in the tensioned reinforcement within the joints. A three-dimensional mathematical model of a river-bed hydroelectric power plant was developed for computational studies.

Conclusions. The condition of the structures of long-term operated reinforced concrete channel buildings of hydroelectric power plants and pressure buildings of pumped-storage hydroelectric power plants may necessitate their reinforcement, for example, with external reinforcement made from carbon composite materials. Based on the results of the laboratory studies, the method of reinforcing the structure of the upper wall of the machine hall of a reinforced concrete channel building of a hydroelectric power plant using carbon composite tapes was validated. A three-dimensional mathematical model of a hydroelectric power plant channel building was created to conduct computational studies.

KEYWORDS: run-of-river hydroelectric power plants, pumped-storage hydroelectric power plants, upper walls of machine halls, shield walls, construction joints between blocks, laboratory tests, and a three-dimensional mathematical model of a run-of-river hydroelectric power plant

FOR CITATION: Zhang Ju. Calculative and experimental studies of reinforced concrete flood control structures and pressure structures at hydroelectric power stations. *Stroitel'stvo: nauka i obrazovanie* [Construction: Science and Education]. 2026; 16(1):3. URL: <http://nso-journal.ru>. DOI: 10.22227/2305-5502.2026.1.3

Corresponding author: Junhao Zhang, weiw0951@gmail.com, lischkin1989@rambler.ru.

ВВЕДЕНИЕ

Русловые гидроэлектростанции (ГЭС) располагаются в русле реки и подвержены действию комплекса нагрузок [1–4]. В качестве примера рассматривается напорная русловая ГЭС Китая Бабанься (рис. 1).

ГЭС Бабанься — низконапорная ГЭС руслового типа в русле р. Хуанхэ (Желтой реки), которая главным образом вырабатывает электроэнергию, а также используется для водоснабжения и орошения. Необходимо отметить, что интенсивность сейсмических воздействий на ГЭС Бабанься может превышать 8 баллов.

Одними из основных несущих конструкций русловых зданий ГЭС являются верховые стены машзалов (которые следует анализировать совместно с перекрытиями), на них действует гидравлическое давление с верховой стороны, передающееся дальше на другие конструкции зданий.

Схема руслового здания ГЭС представлена на рис. 2.

Верховые стены и перекрытия машзалов возводятся поэтапно, делаются перерывы в бетонировании,

устраиваются строительные швы между блоками бетонирования.

На рис. 3 показаны строительные швы между блоками бетонирования верховой стены машинного зала железобетонного руслового здания ГЭС.

Напорное здание гидроаккумулирующей электростанции (ГАЭС), имеющее аналогичные несущие конструкции с русловыми зданиями ГЭС, приведено на рис. 4.

Оно включает фундаментную плиту, щитовую стену с упором в перекрытия, балки, колонны и другие конструкции (рис. 5) при наличии строительных швов между блоками бетонирования (рис. 6).

При этом щитовые стены служат ключевыми несущими конструкциями, на них действует гидравлическое давление со стороны нижнего бьефа, представляя собой многократно повторяющуюся нагрузку¹ [5–8].

¹ Отчет по наблюдениям за основными сооружениями Загорской ГАЭС службы мониторинга оборудования и гидротехнических сооружений в 2022 году, п. Богородское. 2023.

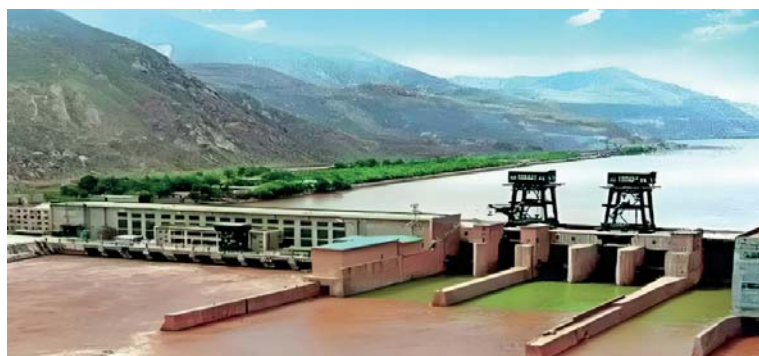


Рис. 1. Вид напорной русловой ГЭС Бабанься

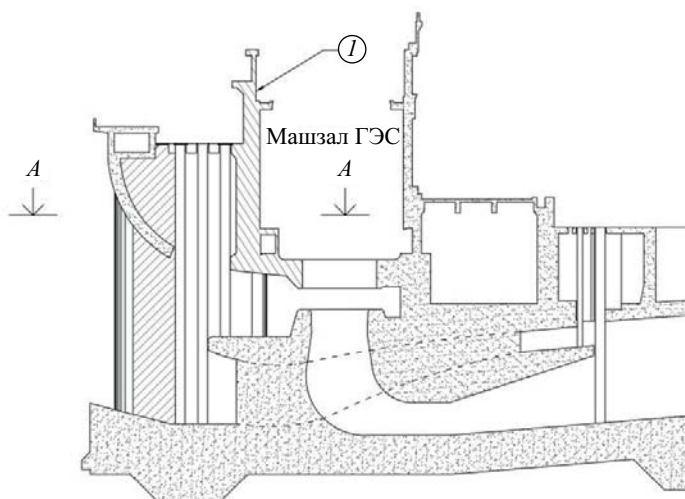


Рис. 2. Русловое здание ГЭС в вертикальном разрезе вдоль потока: *I* — напорная стена машинного зала

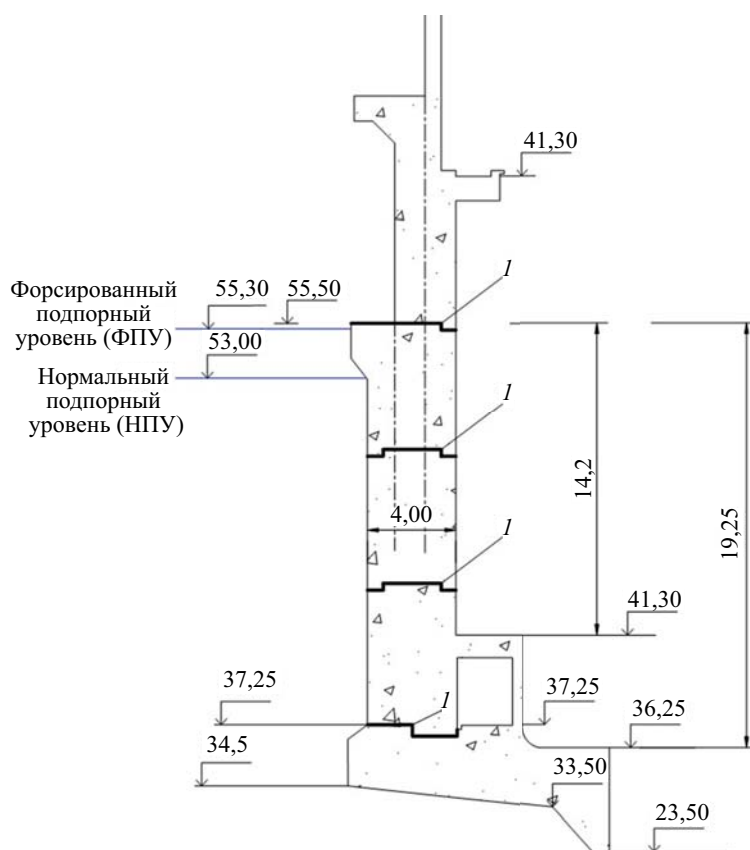


Рис. 3. Строительные швы между блоками бетонирования верховой стены машинного зала (размеры даны в м): *I* — межблочные строительные швы

В ходе многолетней эксплуатации возможно ухудшение состояния конструкций железобетонных русловых зданий ГЭС/напорных зданий ГАЭС, в том числе при раскрытии швов между блоками и появлении трещин в монолитной части [6], что может потребовать их усиления, к примеру внешним

армированием из углеродных композитных материалов.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В целях лабораторных испытаний для обоснования использования углеродных композитных



Рис. 4. Вид напорного здания ГАЭС со стороны нижнего бьефа

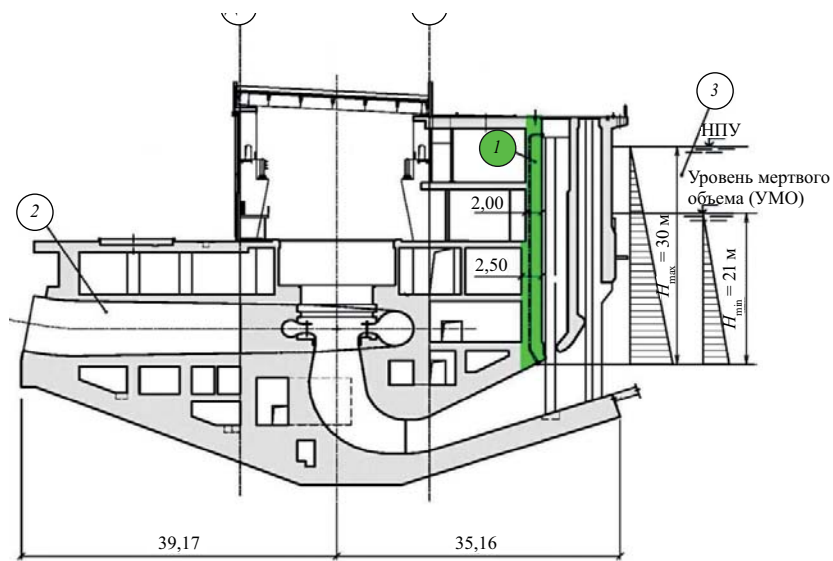


Рис. 5. Вертикальный разрез напорного здания ГАЭС (размеры даны в м): 1 — щитовая стена; 2 — напорные водоводы; 3 — нижний бассейн

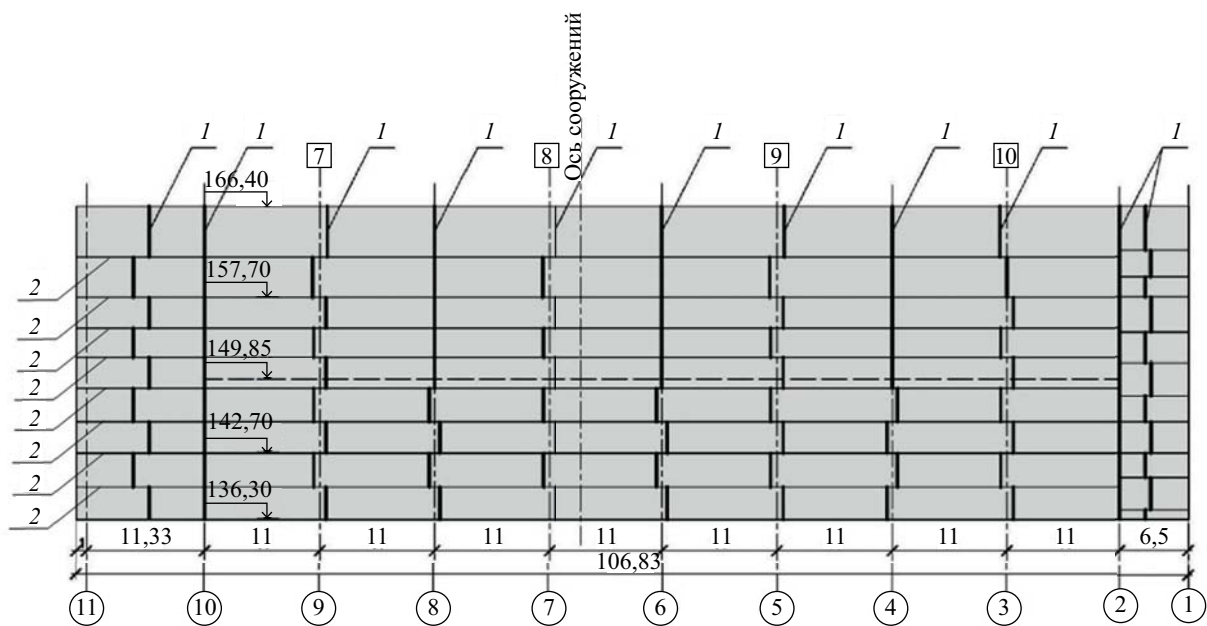


Рис. 6. Вертикальные (1) и горизонтальные (2) строительные швы в щитовой стене напорного здания ГАЭС

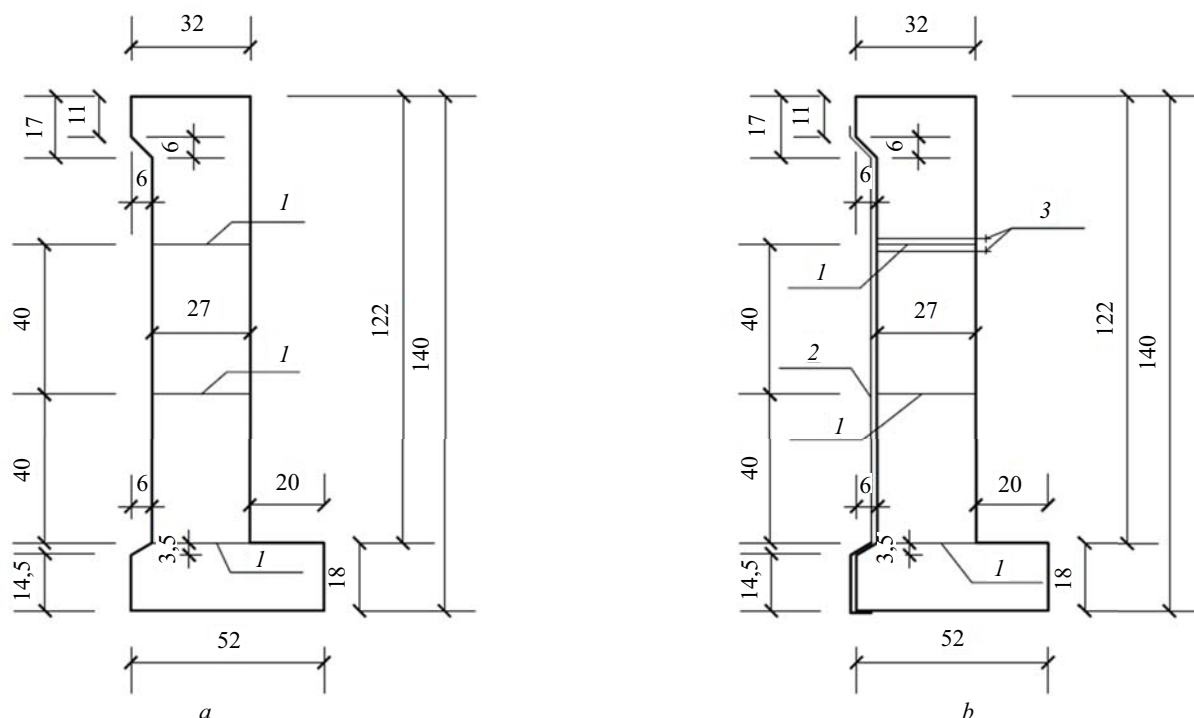


Рис. 7. Модели напорной стены машзала из железобетона (размеры даны в см): *a* — без усиления; *b* — усиленные углеродной лентой; 1 — строительные швы между блоками; 2 — углеродная композитная лента; 3 — анкеры

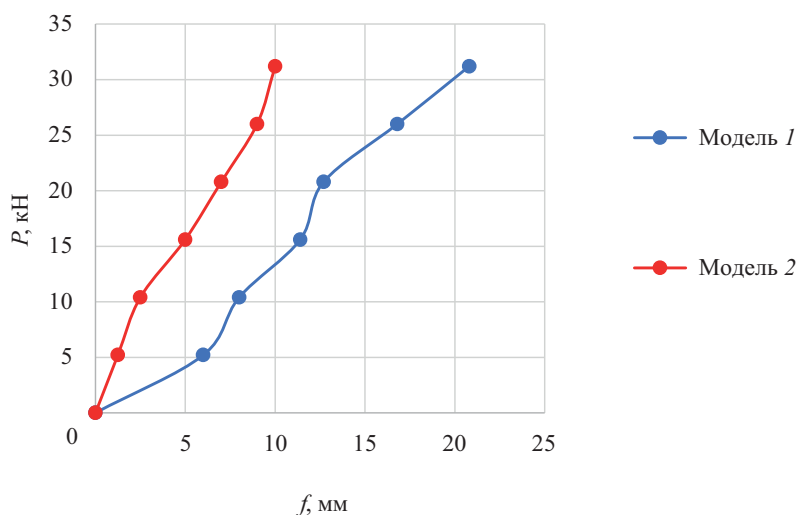


Рис. 8. Горизонтальное смещение верха моделей 1 и 2: модель 1 — без усиления; модель 2 — усиленная углеродной лентой

материалов при усилении конструкции верховой стены машинного зала железобетонного руслового здания ГЭС изготавливались опытные модели в масштабе 1:15.

Одна из моделей выполнена из железобетона (рис. 7, *a*), вторая модель из железобетона усиливалась углеродной композитной лентой, установленной на тыловой растянутой грани модели (рис. 7, *b*).

Для проведения расчетных исследований создана трехмерная математическая модель железобетонного руслового здания ГЭС, в которой моделируются характерные особенности, присущие гидротехниче-

скому сооружению (ГТС). При этом учтен опыт численного моделирования и расчетов ГТС [9–19].

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Полученные результаты проведенных лабораторных испытаний модели 1, изготовленной без усиления, и модели 2, усиленной углеродной лентой на растянутой грани, представлены в виде графиков на рис. 8–12.

Как видно из результатов экспериментальных исследований, усиление моделей железобетонных кон-

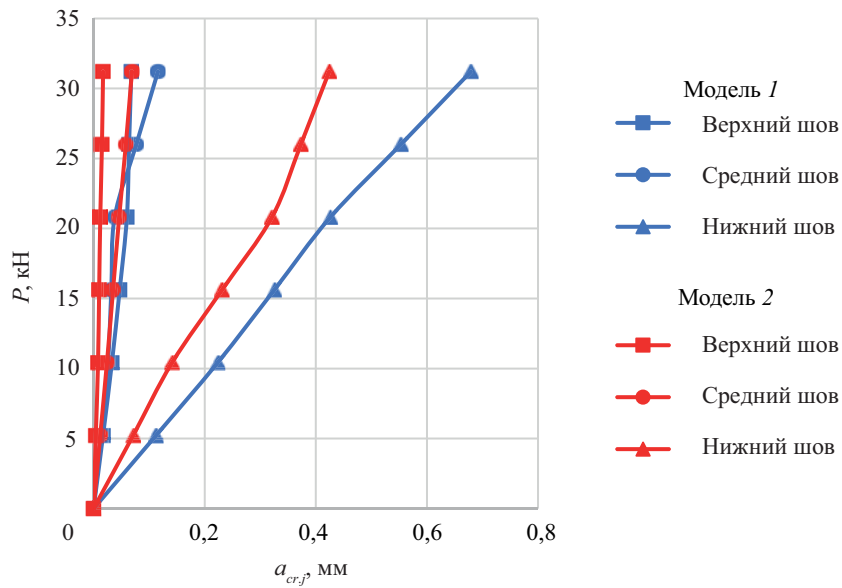


Рис. 9. Ширина раскрытия межблочных швов: модель 1 — без усиления; модель 2 — усиленная углеродной лентой

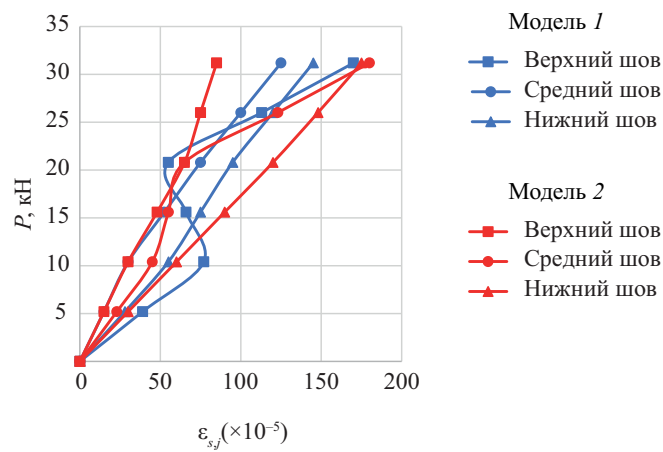


Рис. 10. Относительная деформация растянутой арматуры в швах: модель 1 — без усиления; модель 2 — усиленная углеродной лентой (по максимальным значениям из трех тензорезисторов)

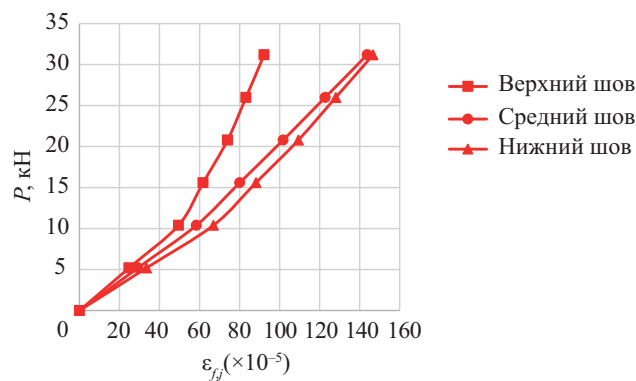


Рис. 11. Относительная деформация углеродной ленты в швах модели 2 (усиленная углеродной лентой)

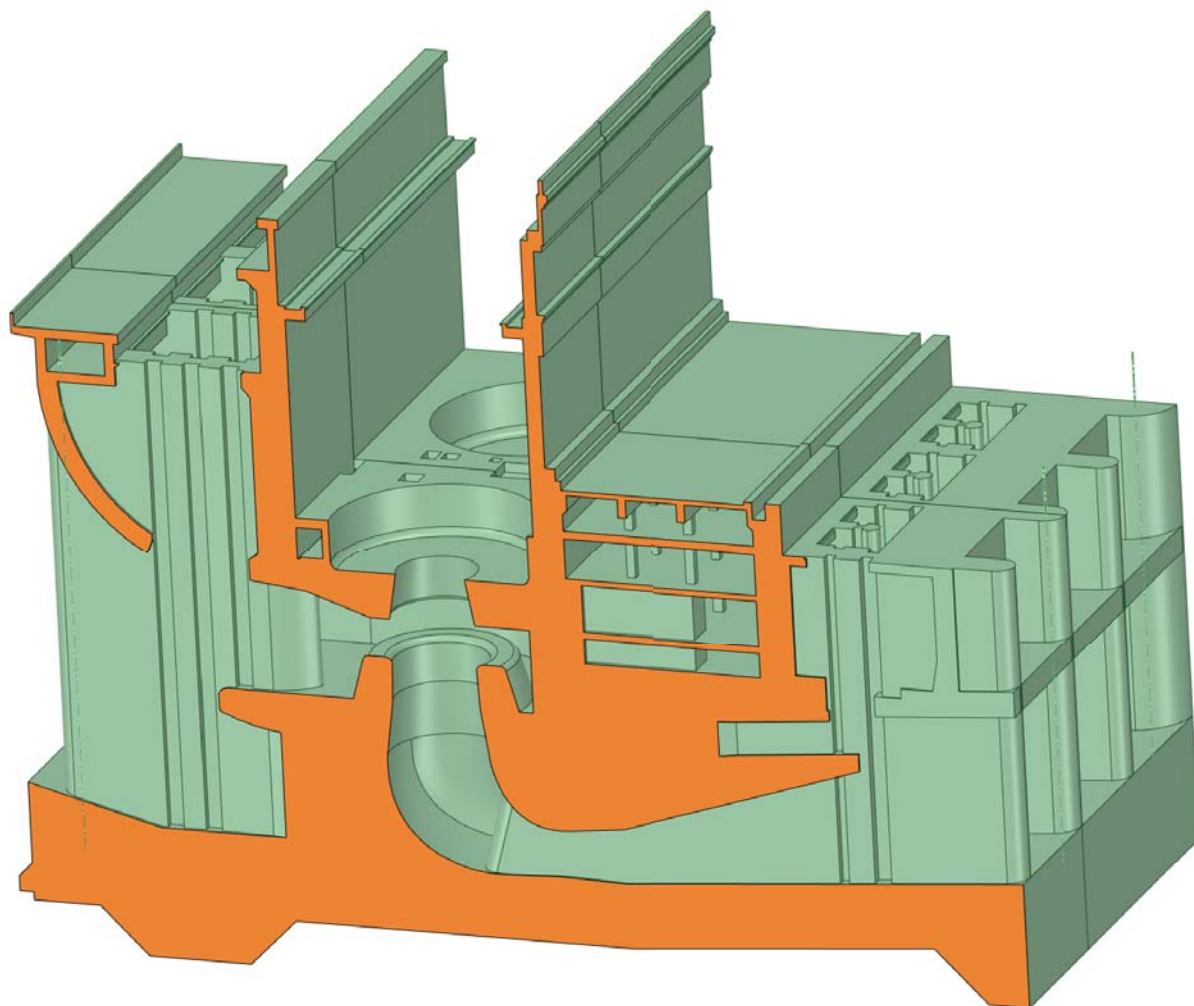


Рис. 12. Трехмерная моделируемая расчетная область руслового здания ГЭС, в разрезе видны напорная стена машзала, перекрытие машзала и другие конструкции

струкций углеродной лентой оказывает существенное влияние на их напряженно-деформированное состояние (НДС).

Трехмерная математическая модель руслового здания ГЭС показана на рис. 12.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Установлено, что основными несущими конструкциями железобетонных русловых зданий ГЭС/напорных зданий ГАЭС являются соответственно верховые стены машинных залов и щитовые стены, состояние которых может потребовать их усиления.

В железобетонных конструкциях длительно эксплуатируемых русловых зданий ГЭС и напорных

зданий ГАЭС образуются трещины по строительным швам между блоками и в монолитной части, которые невозможно полностью отремонтировать путем инъектирования ремонтными материалами.

Целесообразно выполнять усиление, например, внешним армированием из композитных материалов.

Из результатов лабораторных испытаний следует, что усиление моделей железобетонных конструкций углеродной лентой оказывает значительное влияние на их НДС.

Расчетные исследования НДС выполнены на основе трехмерных математических моделей руслового здания ГЭС и напорного здания ГАЭС, в которых учитываются характерные особенности, присущие ГЭС.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Raja A.K., Srivastava A.P., Dwivedi M. Power Plant Engineering. New Delhi : New Age International, 2006. 354 p.

2. 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. Vol. 51. Issue 1. Pp. 33–39. DOI: 10.1007/s10749-017-0779-y

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

4. *Rodrigues R.V.* Structural Design of a Surface Hydropower Plant. Technical University of Lisbon, 2014. Pp. 1–9.

5. *Беллендир Е.Н., Лисичкин С.Е., Рубин О.Д.* Обоснование эксплуатационного состояния здания станционного узла Загорской ГАЭС-2 // Гидротехническое строительство. 2020. № 10. С. 5–13. EDN ILATSL.

6. *Рубин О.Д., Беллендир Е.Н., Фролов К.Е., Баклыков И.В., Ильин Ю.А., Лисичкин С.Е.* Анализ характера трещинообразования стен здания станционного узла ГАЭС и стен багпорта сухого дока с разработкой мероприятий по усилению // Природообустройство. 2022. № 4. С. 63–74. DOI: 10.26897/1997-6011-2022-4-63-74. EDN FBAMPY.

7. *Данила С., Шикинис А.* Состояние гидротехнических сооружений и окружающей среды Крунисской гидроаккумулирующей электростанции // Гидротехническое строительство. 2007. № 7. С. 1–14. EDN IANKVD.

8. *Потапник Н.И.* Некоторые вопросы эксплуатации Киевской ГАЭС // Гидротехническое строительство. 1978. № 7. С. 9–12.

9. *Рубин О.Д., Ильин Ю.А., Лисичкин С.Е., Нефедов А.В., Розанова Н.В., Черненко В.Н.* Оценка напряженно-деформированного состояния и прочности железобетонных конструкций компенсационных секций напорных водоводов Загорской ГАЭС // Гидротехническое строительство. 2001. № 9. С. 16–19.

10. *Рубин О.Д., Лисичкин С.Е., Гребенцов В.П., Цыбаков В.А., Нефедов А.В., Катанов А.Д. и др.* Расчетное обоснование решений по обеспечению надежности конструкций водосброса № 2 бетонной плотины Богучанской ГАЭС // Известия ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева. 2005. Т. 244. С. 228–234. EDN IBXJZX.

11. *Рубин О.Д., Лисичкин С.Е., Ляпин О.Б., Нефедов А.В.* Исследования бетонных и железобетонных энергетических сооружений // Гидротехническое строительство. 1999. № 8/9. С. 22–28.

12. *Рубин О.Д., Антонов А.С., Лисичкин С.Е., Баклыков И.В., Бекин Н.В., Фролов К.Е.* Расчетное обоснование технического решения по усилению железобетонного перекрытия машинного зала ГАЭС // Строительство: наука и образование. 2019. Т. 9. № 1 (31). С. 4. DOI: 10.22227/2305-5502.2019.1.4. EDN ZYDXID.

13. *Spyrakos C.C., Raftoyiannis I.G., Credali L., Ussia J.* Experimental and Analytical Study on Reinforced Concrete Beams in Bending Strengthened with FRP // The Open Construction and Building Technology Journal. 2014. Vol. 8. Issue 1. Pp. 153–163. DOI: 10.2174/1874836801408010153

14. *Zhou Y., Gou M., Zhang F., Zhang S., Wang D.* Reinforced concrete beams strengthened with carbon fiber reinforced polymer by friction hybrid bond technique: Experimental investigation // Materials & Design. 2013. Vol. 50. Pp. 130–139. DOI: 10.1016/J.MATDES.2013.02.089

15. *Герфанова О.А., Осипов П.В., Фролов К.Е.* Система внешнего армирования строительных конструкций полимерными композитами на основе углеродных волокон для гидротехнического строительства // Известия Всероссийского научно-исследовательского института гидротехники им. Б.Е. Веденеева. 2019. Т. 291. С. 36–46. EDN MNQORR.

16. *Сердюк А.И., Чернявский В.Л.* Опыт усиления строительных конструкций композиционными материалами при реконструкции Баксанской ГАЭС // Гидротехника. 2013. № 3. С. 115–117.

17. *Александров А.В.* Разработка и обоснование метода выравнивания гидротехнических сооружений, подвергшихся неравномерным осадкам : дис. ... канд. техн. наук. М., 2018. 172 с. EDN MYQZRT.

18. *Александров А.В., Беллендир Е.Н., Лащенков С.Я., Альжанов Р.Ш.* Ликвидация последствий осадки здания станционного узла Загорской ГАЭС-2 восстановительные работы // Гидротехническое строительство. 2016. № 7. С. 2–10. EDN WHPWUX.

19. *Bellendir E.N., Lisichkin S.E., Rubin O.D.* The Operational State Justification of the Building of the Station Unit of Zagorskaya PSPP-2 // Power Technology and Engineering. 2021. Vol. 54. Issue 6. Pp. 806–813. DOI: 10.1007/s10749-021-01291-6. EDN ETYFOA.

Поступила в редакцию 24 июля 2025 г.

Принята в доработанном виде 26 сентября 2025 г.

Одобрена для публикации 8 октября 2025 г.

ОБ АВТОРЕ: **Цзюньхао Чжан** — аспирант кафедры гидравлики и гидротехнического строительства; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; SPIN-код: 9747-3842, ORCID: 0009-0006-0490-210X; weiw0951@gmail.com.

INTRODUCTION

Run-of-river hydroelectric power stations (HPP) are located within the river channel and are subject to a variety of loads [1–4]. The Babanxia run-of-river HPP in China is considered here as an example (Fig. 1).

The Babansia HPP is a low-head run-of-river HPP on the Huanghe (Yellow River), which primarily generates electricity and is also used for water supply and irrigation. It should be noted that the intensity

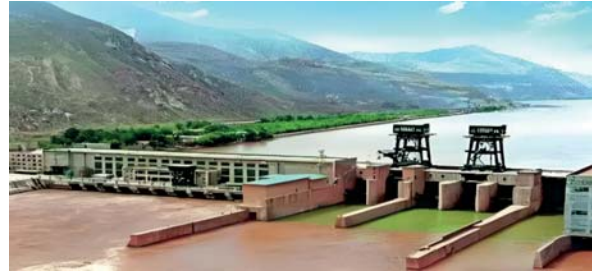


Fig. 1. View of the Babansya run-of-river HPP

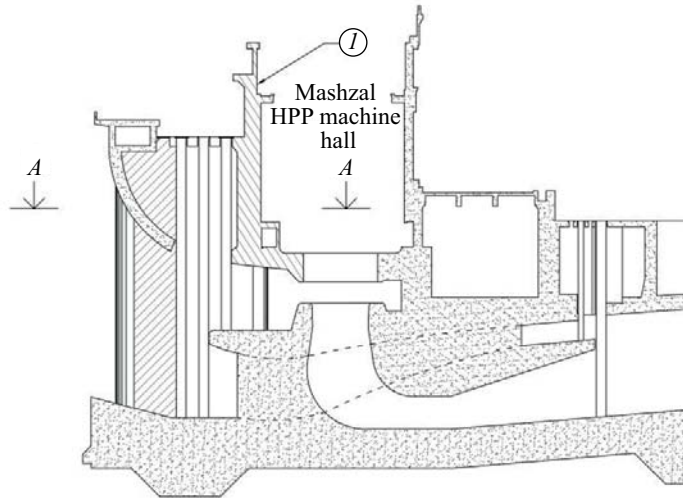


Fig. 2. Run-of-river HPP building in a vertical section along the flow: *I* — head wall of the machine hall

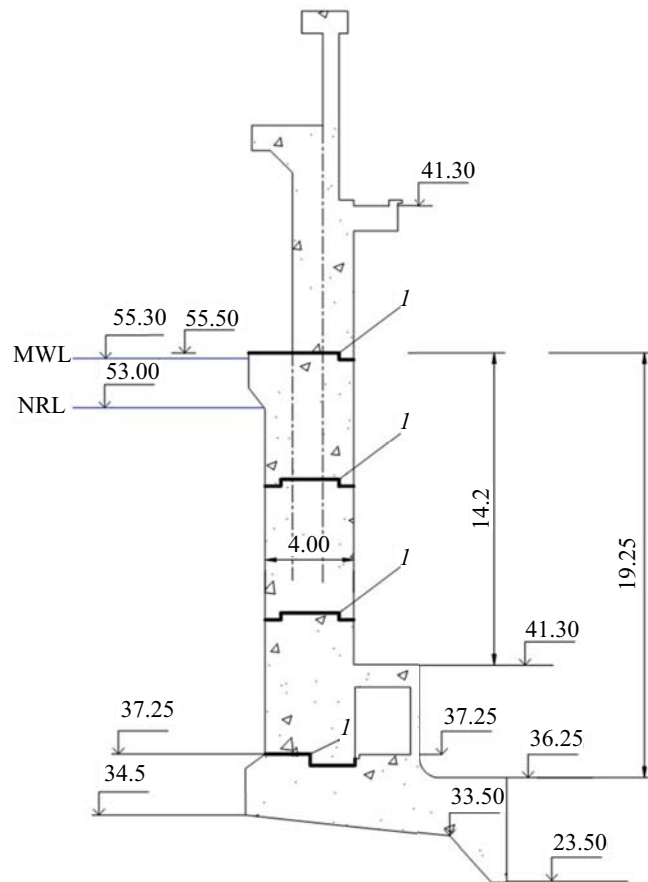


Fig. 3. Construction joints between the concrete pouring sections of the machine hall headwall (dimensions in m): *I* — intersection construction joints



Fig. 4. View of the PSPP head building from the downstream side

of seismic impacts on the Babansia HPP may exceed 8 on the Richter scale.

One of the main load-bearing structures of run-of-river HPP buildings are the head walls of the turbine halls (which should be analyzed in conjunction with the floor slabs); these are subjected to hydraulic pressure from the upstream side, which is transmitted further to other building structures.

A diagram of a run-of-river HPP building is shown in Fig. 2.

The upstream walls and floors of the machine halls are constructed in stages, with breaks in the concreting process and construction joints between the concreting sections.

Fig. 3 shows the construction joints between the concrete pouring sections of the upper wall of the machine hall in the reinforced concrete riverbed building of the hydroelectric power station.

The head building of a pumped-storage power station (PSPP), which has load-bearing structures similar to those of a run-of-river power station, is shown in Fig. 4.

It comprises a foundation slab, a shear wall supported by the floor slabs, beams, columns and other structures (Fig. 5), with construction joints between the concrete pouring sections (Fig. 6).

In this context, the panel walls serve as key load-bearing structures; they are subjected to hydraulic pres-

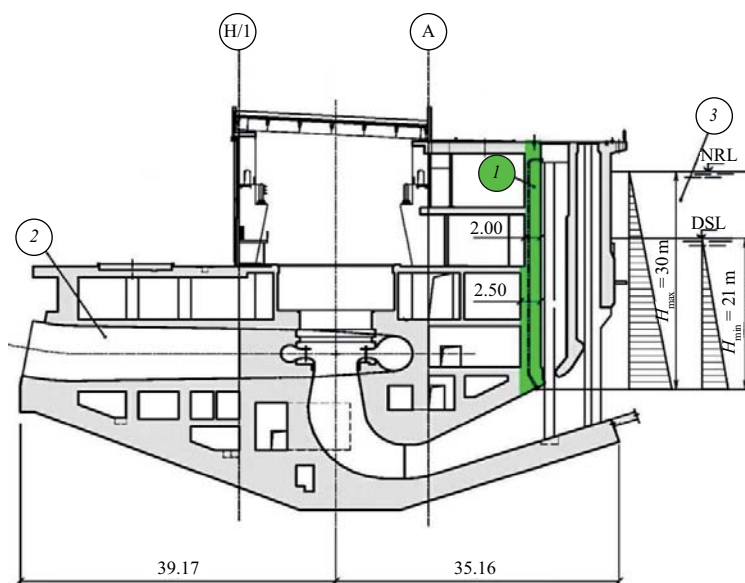


Fig. 5. Vertical section of the head building of the PSPP (dimensions in m): 1 — retaining wall; 2 — pressure conduits; 3 — lower reservoir

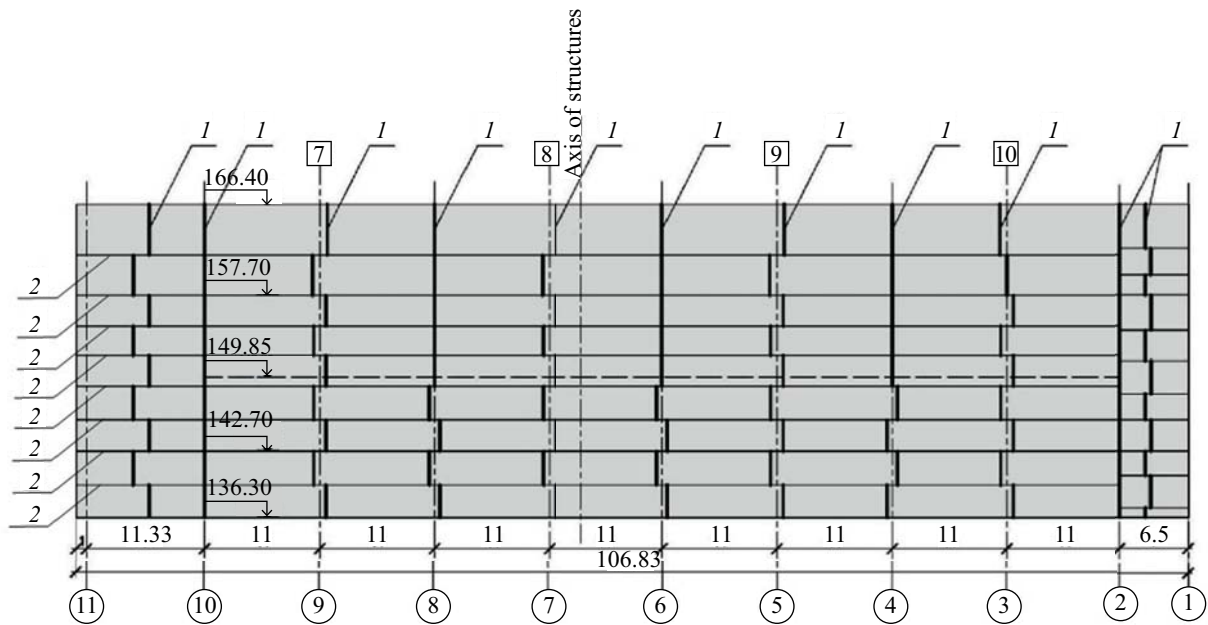


Fig. 6. Vertical (1) and horizontal (2) construction joints in the diaphragm wall of the head building of the PSPP

sure from the lower reservoir, representing a cyclic load¹ [5–8].

Over the course of many years of operation, the condition of reinforced concrete riverbed structures at hy-

¹ Report on the monitoring of key structures at the Zagorsk Pumped Storage Power Station by the Equipment and Hydraulic Structures Monitoring Service in 2022, Bogorodskoye. 2023.

droelectric power stations (HPP) and pressure structures at pumped-storage power stations (PSPP) may deteriorate, including through the opening of joints between blocks and the appearance of cracks in the monolithic sections [6], which may necessitate their reinforcement, for example, using external reinforcement made of carbon composite materials.

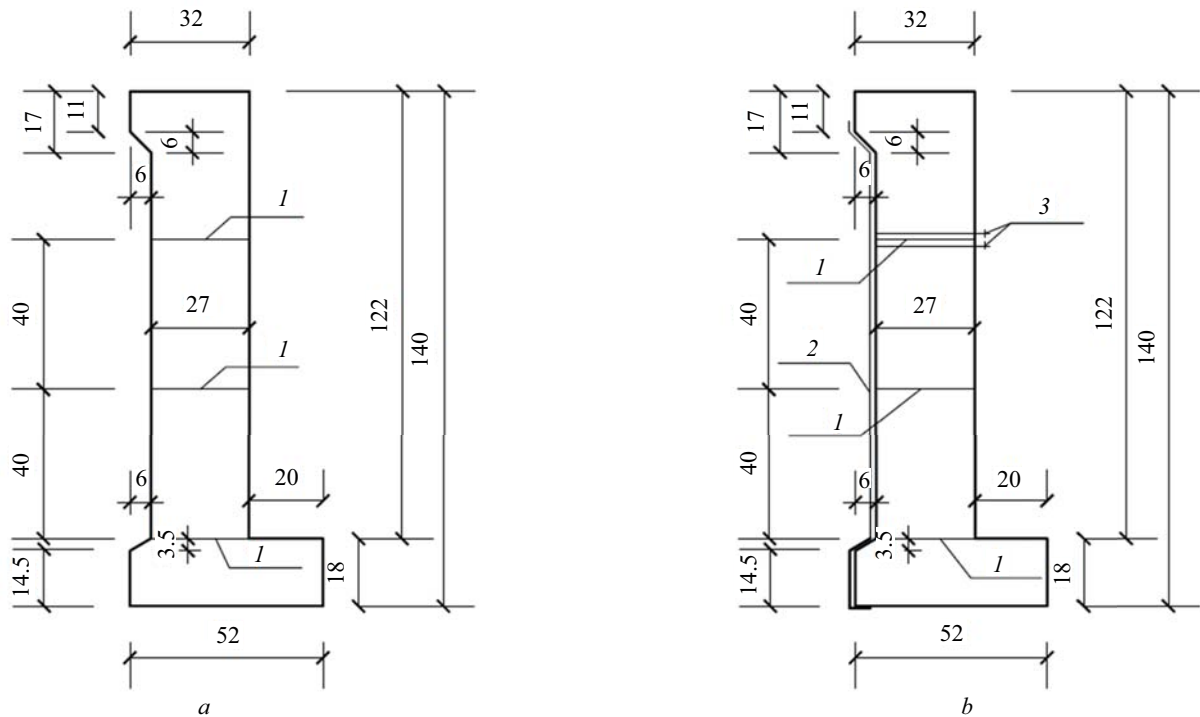


Fig. 7. Models of the reinforced concrete machine hall headwall (dimensions in cm): *a* — unreinforced; *b* — reinforced with carbon tape; 1 — construction joints between blocks; 2 — carbon composite tape; 3 — anchors

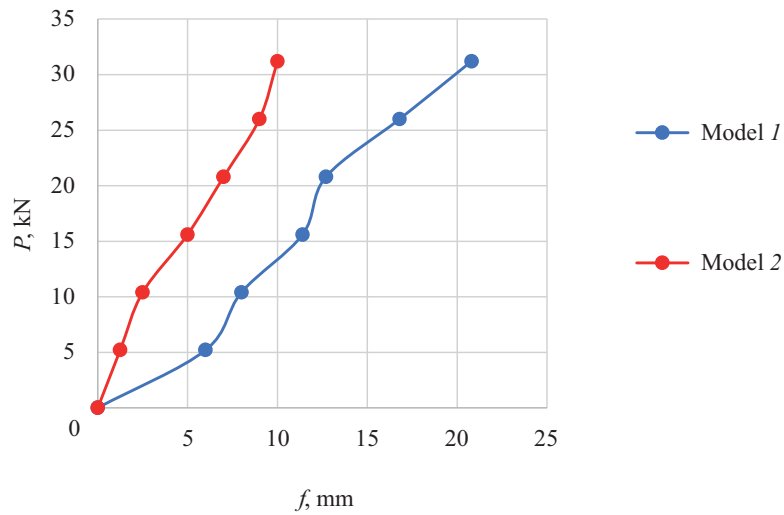


Fig. 8. Horizontal displacement of the top of models 1 and 2: Model 1 — unreinforced; Model 2 — reinforced with carbon tape

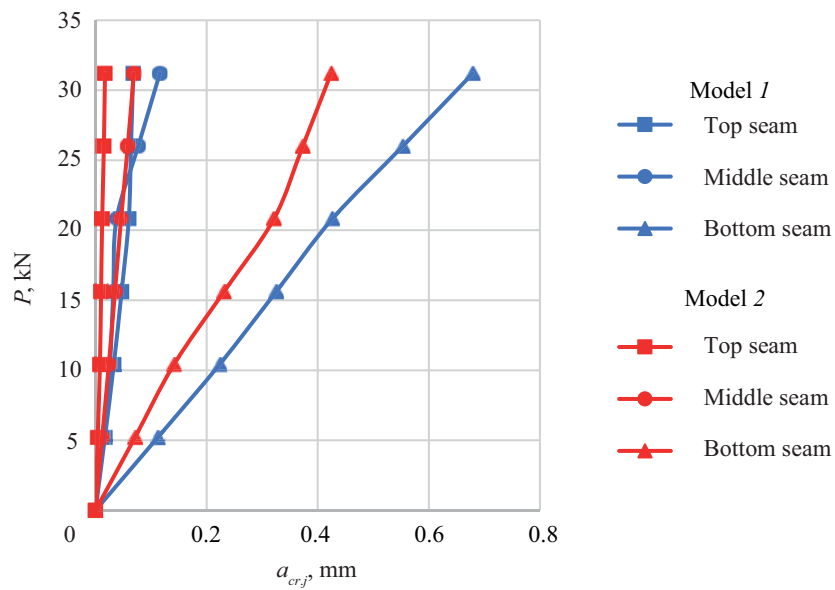


Fig. 9. Width of inter-block joints: Model 1 — without reinforcement; Model 2 — reinforced with carbon tape

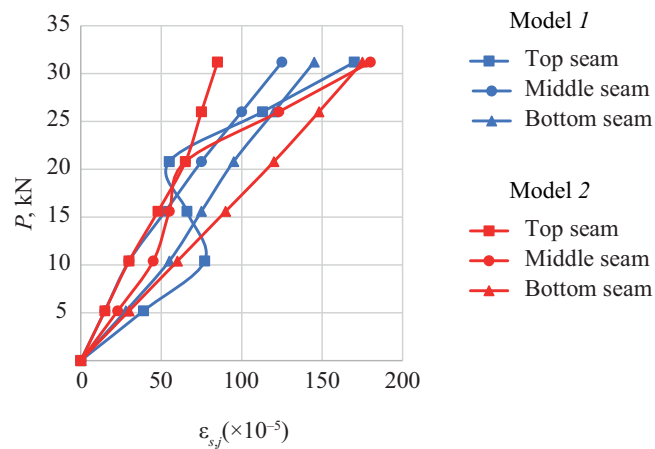


Fig. 10. Relative deformation of tensioned reinforcement in joints: Model 1 — unreinforced; Model 2 — reinforced with carbon tape (based on the maximum values from three strain gauges)

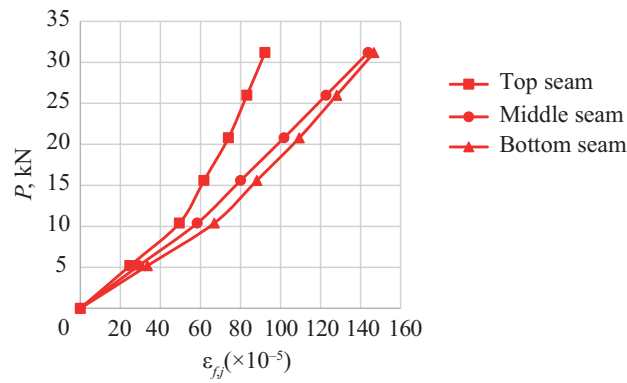


Fig. 11. Relative deformation of the carbon tape in the joints of model 2 (reinforced with carbon tape)

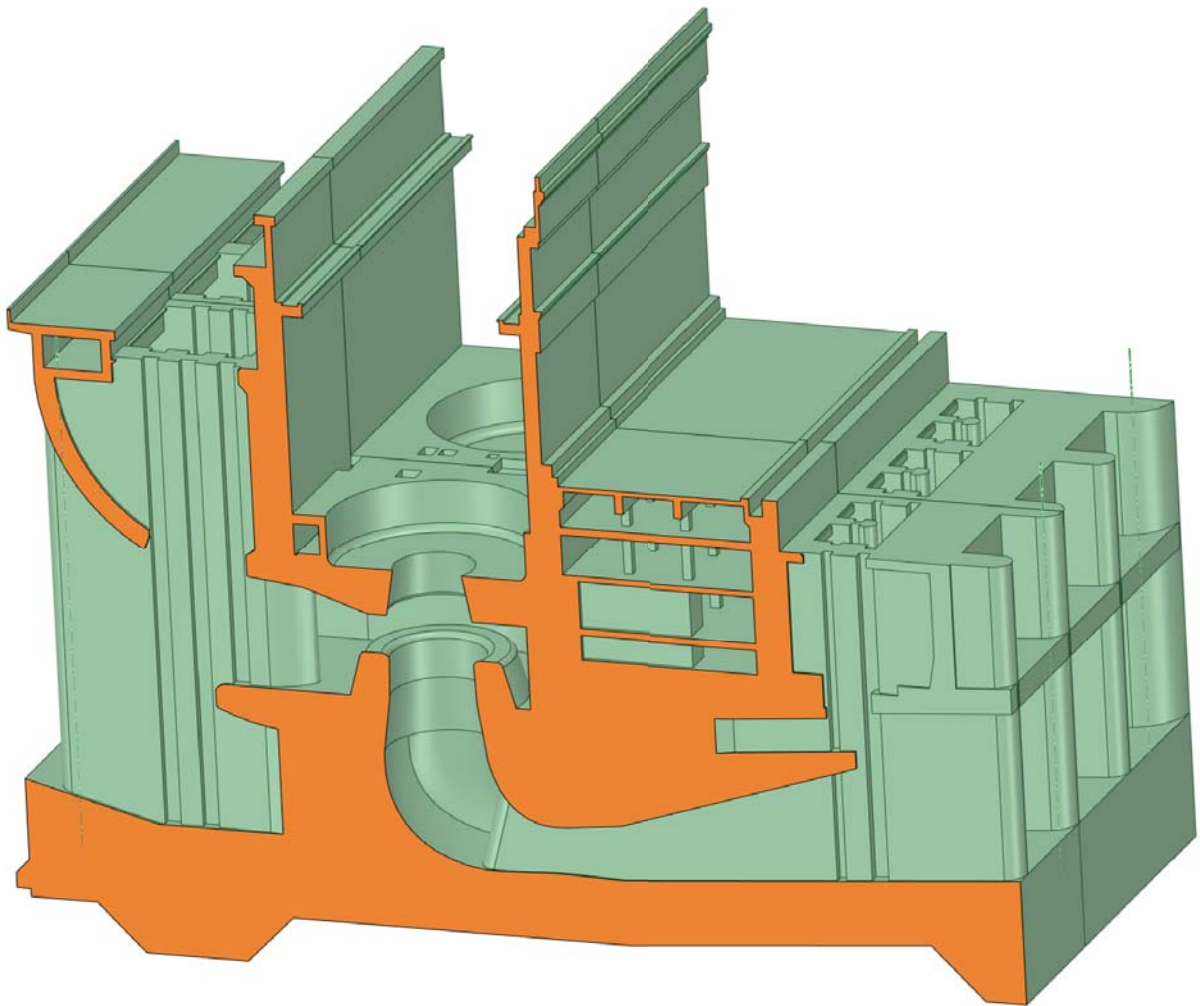


Fig. 12. Three-dimensional simulated mathematical model of the riverbed structure of the HPP; the cross-section shows the machine hall headwall, the machine hall floor slab and other structures

MATERIALS AND METHODS

For the purposes of laboratory testing to justify the use of carbon composite materials in the reinforcement of the upstream wall of the machine hall of a reinforced concrete riverbed building of a hydroelectric power station, experimental models were fabricated on a 1:15 scale.

One of the models was made of reinforced concrete (Fig. 7, *a*), whilst the second model, also made of reinforced concrete, was reinforced with a carbon composite tape applied to the rear tension face of the model (Fig. 7, *b*).

A three-dimensional mathematical model of a reinforced concrete riverbed structure at a hydro-electric power station has been developed for computational studies,

in which the characteristic features inherent to hydraulic structures are modelled. This model takes into account the experience gained from numerical modelling and calculations of hydraulic structures [9–19].

RESULTS OF THE STUDY

The results obtained from laboratory tests of Model 1, manufactured without reinforcement, and Model 2, reinforced with carbon tape on the tension face, are presented in the form of graphs in Fig. 8–12.

As can be seen from the results of experimental studies, the reinforcement of reinforced concrete structure models with carbon tape has a significant effect on their stress-strain state (SSS).

A three-dimensional mathematical model of the riverbed structure of a hydroelectric power station is shown in Fig. 12.

CONCLUSION AND DISCUSSION

It was established that the main load-bearing structures of reinforced concrete riverbed buildings of HPP and

pressure buildings of PSPP are, respectively, the upper walls of the machine halls and the end walls, the condition of which may require reinforcement.

In the reinforced concrete structures of long-serving riverbed buildings of HPP and head buildings of PSPP, cracks form along the construction joints between blocks and in the monolithic sections, which cannot be fully repaired by injection with repair materials.

It is advisable to carry out reinforcement, for example, using external reinforcement made of composite materials.

Laboratory test results indicate that reinforcing reinforced concrete structure models with carbon fibre tape has a significant effect on their structural behaviour.

The structural analysis was carried out using three-dimensional mathematical models of the riverbed building of a hydroelectric power station and the head building of a pumped-storage power station, which take into account the characteristic features inherent to hydroelectric power systems.

REFERENCES

1. Raja A.K., Srivastava A.P., Dwivedi M. *Power Plant Engineering*. New Delhi, New Age International, 2006; 354.
2. 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. DOI: 10.1007/s10749-017-0779-y
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
4. Rodrigues R.V. *Structural Design of a Surface Hydropower Plant*. Technical University of Lisbon, 2014; 1-9.
5. Bellendir E.N., Lisichkin S.E., Rubin O.D. The operational state justification of the building of the station unit of Zagorskaya PSPP-2. *Power Technology and Engineering*. 2020; 10:5-13. EDN ILATSL. (rus.).
6. Rubin O.D., Bellendir E.N., Frolov K.E., Baklykov I.V., Iljin Yu.A., Lisichkin S.E. Analysis of the nature of cracking of the walls of the building of the HSPP station unit and the walls of the floating bulkhead of the dry dock with the development of measures on strengthening. *Prirodobustrojstvo*. 2022; 4:63-74. DOI: 10.26897/1997-6011-2022-4-63-74. EDN FBAMPY. (rus.).
7. Danila S., Shikshnis A. The state of hydraulic structures and the environment of the Kruonis pumped storage power plant. *Power Technology and Engineering*. 2007; 7:1-14. EDN IAHKVD. (rus.).
8. Potashnik N.I. Some issues of operation of the Kyiv pumped storage power plant. *Power Technology and Engineering*. 1978; 7:9-12. (rus.).
9. Rubin O.D., Ilyin Yu.A., Lisichkin S.E., Nefedov A.V., Rozanova N.V., Chernenko V.N. Assessment of the stress-strain state and strength of reinforced concrete structures of compensation sections of pressure water pipelines of the Zagorsk Pumped Storage Power Plant. *Power Technology and Engineering*. 2001; 9:16-19. (rus.).
10. Rubin O.D., Lisichkin S.Ye., Grebenshchikov V.P., Tsibakov V.A., Nefedov A.V., Katanov A.D. et al. Calculation substantiation of decisions on providing reliability of water discharge structure No. 2 of Bogutchaevsk HPP concrete dam. *Proceedings of the VNIIG*. 2005; 244: 228-234. EDN IBXJZX. (rus.).
11. Rubin O.D., Lisichkin S.E., Lyapin O.B., Nefedov A.V. Research of concrete and reinforced concrete energy structures. *Power Technology and Engineering*. 1999; 8/9:22-28. (rus.).
12. Rubin O.D., Antonov A.S., Lisichkin S.E., Baklykov I.V., Bekin N.V., Frolov K.E. Estimated justification of technical decision on strengthening reinforced concrete machine hall floor. *Construction: Science and Education*. 2019; 9(1):(31):4. DOI: 10.22227/2305-5502. 2019.1.4. EDN ZYDXID. (rus.).
13. Spyrakos C.C., Raftoyiannis I.G., Credali L., Ussia J. Experimental and Analytical Study on Reinforced Concrete Beams in Bending Strengthened with FRP. *The Open Construction and Building Technology Journal*. 2014; 8(1):153-163. DOI: 10.2174/1874836801408010153

14. Zhou Y., Gou M., Zhang F., Zhang S., Wang D. Reinforced concrete beams strengthened with carbon fiber reinforced polymer by friction hybrid bond technique: Experimental investigation. *Materials & Design*. 2013; 50:130-139. DOI: 10.1016/J. MATDES.2013.02.089

15. Gerfanova O.A., Osipov P.V., Frolov K.E. Civil structures external reinforcement system with polymer composites based on carbon fibers for hydrotechnical construction. *Proceedings of the VNIIG*. 2019; 291:36-46. EDN MNQORR. (rus.).

16. Serdyuk A.I., Chernyavsky V.L. Experience Reinforcing Building Structures with Composite Materials during the Reconstruction of the Baksan Hydroelectric Power Station. *The Hydrotechnika*. 2013; 3:115-117. (rus.).

17. Aleksandrov A.V. *Development and justification of a method for leveling hydraulic structures subjected to uneven settlement*. Moscow, 2018; 172. EDN MYQZRT. (rus.).

18. Aleksandrov A.V., Belledir E.N., Lashchenov S.Ya., Alzhanov R.Sh. Elimination of the Consequences of Settlement of the Zagorsk Pumped Storage Power Plant-2 Station Building and Restoration Work. *Power Technology and Engineering*. 2016; 7:2-10. EDN WHPWUX. (rus.).

19. Bellendir E.N., Lisichkin S.E., Rubin O.D. The Operational State Justification of the Building of the Station Unit of Zagorskaya PSPP-2. *Power Technology and Engineering*. 2021; 54(6):806-813. DOI: 10.1007/s10749-021-01291-6. EDN ETYFOA.

Received July 24, 2025.

Adopted in revised form on September 26, 2025.

Approved for publication on October 8, 2025.

B I O N O T E S : **Junhao Zhang**— 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: 9747-3842, ORCID: 0009-0006-0490-210X; weiw0951@gmail.com.