

Оригинальная статья

УДК 626/627

<https://doi.org/10.26897/1997-6011-2026-2-72-82>

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ЖЕЛЕЗОБЕТОННОГО ФРАГМЕНТА НАПОРНОЙ СТЕНЫ РУСЛОВОГО ЗДАНИЯ ГЭС, УСИЛЕННОГО ВНЕШНИМ АРМИРОВАНИЕМ НА ОСНОВЕ КОМПОЗИТНЫХ УГЛЕРОДНЫХ ЛЕНТ

О.Д. Рубин<sup>1</sup>, А.В. Александров<sup>2</sup>, Чжан Цзюньхао<sup>3</sup>, В.Б. Балагуров<sup>4</sup>, С.Е. Лисичкин<sup>5</sup>✉

<sup>1,3</sup> ФГБОУ «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет»;

г. Москва, Российская Федерация

<sup>2</sup> АО «Институт Гидропроект»; г. Москва, Российская Федерация

<sup>4,5</sup> Филиал АО «Институт Гидропроект» – «НИИЭС»; г. Москва, Российская Федерация

<sup>1</sup> rubinod@niies.ru; ORCID: 0000-0002-0630-3251

<sup>2</sup> a.aleksandrov@hydroproject.ru; SPIN-код: 4152-5972

<sup>3</sup> weiw0951@gmail.com; ORCID: 0009-0006-0490-210X

<sup>4</sup> v.balagurov@hydroproject.ru

<sup>5</sup> lisichkin1989@rambler.ru; ORCID: 0000-0003-2761-331X

**Аннотация.** Здания русловых ГЭС размещаются в руслах рек. Напорные стены их машинных залов работают совместно с перекрытиями машинных залов, образуя основную несущую конструкцию здания ГЭС, которая воспринимает комплекс нагрузок. Русловые здания ГЭС и напорные здания ГАЭС имеют значительное сходство между собой, в том числе, одинаковые основные несущие железобетонные конструкции, в первую очередь, напорные верховые стены машинных залов и напорные щитовые стены с упором в перекрытия. Относящиеся к классу массивных гидротехнических конструкций напорные стены и перекрытия машинных залов русловых зданий ГЭС (щитовые стены зданий ГАЭС) состоят из отдельных блоков, разделенных межблочными строительными швами. Ослабленные по сравнению с монолитом, межблочные строительные швы провоцируют появление трещин, снижающих прочность и эксплуатационную надежность здания ГЭС/ГАЭС в целом, которые трудно отремонтировать традиционными способами. Для экспериментального обоснования усиления железобетонных конструкций ГЭС внешним армированием с применением композитных углеродных материалов проведен комплекс лабораторных исследований железобетонных моделей фрагмента напорной стены машинного зала руслового здания ГЭС в масштабе 1:15. Одни модели были без усиления, другие – с усилением внешним армированием из композитной углеродной ленты. В результате лабораторных исследований было установлено, что система внешнего армирования из углеродных лент способствует: уменьшению ширины раскрытия межблочных строительных швов  $a_{cr}$  и растягивающих напряжений в рабочей стальной арматуре  $\sigma_{s,ш}$ , перемещений  $f$  верха моделей; возникновению растягивающих напряжений  $\sigma_{f,ш}$  в элементе усиления (композитной углеродной ленте). При этом нагрузка разрушения усиленной модели увеличивается по сравнению с не усиленной моделью. Таким образом, проведенные исследования позволили экспериментально обосновать эффективность усиления напорных стен машинных залов ГЭС внешним армированием из композитных углеродных лент.

**Ключевые слова:** русловые здания ГЭС, машинный зал, напорная стена совместно с перекрытием, экспериментальные исследования, внешнее армирование, композитные углеродные ленты

**Для цитирования:** Рубин О.Д., Александров А.В., Чжан Цзюньхао, Балагуров В.Б., Лисичкин С.Е. Экспериментальные исследования железобетонного фрагмента напорной стены руслового здания ГЭС, усиленного внешним армированием на основе композитных углеродных лент. Природообустройство. 2026;Т.19(2):72-82. <https://doi.org/10.26897/1997-6011-2026-2-72-82>

Original article

# EXPERIMENTAL RESEARCH OF A REINFORCED CONCRETE FRAGMENT OF A PRESSURE WALL OF A RIVERBED HYDROELECTRIC POWER PLANT REINFORCED WITH EXTERNAL REINFORCEMENT BASED ON COMPOSITE CARBON TAPES

O.D. Rubin<sup>1</sup>, A.V. Aleksandrov<sup>2</sup>, Zhang Junhao<sup>3</sup>, V.B. Balagurov<sup>4</sup>, Lisichkin S.E.<sup>5</sup>✉<sup>1,3</sup> National Research Moscow State University of Civil Engineering; Moscow, Russian Federation<sup>2</sup> JSC "Institute Hydroproject", Moscow, Russian Federation<sup>4,5</sup> Branch of JSC Institute Hidroproekt – NIIES; Moscow, Russian Federation<sup>1</sup> rubinod@niies.ru; ORCID: 0000-0002-0630-3251<sup>2</sup> a.aleksandrov@hydroproject.ru;<sup>3</sup> weiw0951@gmail.com; ORCID: 0009-0006-0490-210X<sup>4</sup> v.balagurov@hydroproject.ru<sup>5</sup> lisichkin1989@rambler.ru; ORCID: 0000-0003-2761-331X

**Abstract.** The buildings of river-bed hydroelectric power plants are located in the riverbeds. The pressure walls of their machine halls work together with the ceilings of the machine halls, forming the main load-bearing structure of the hydroelectric power plant building, which carries of loads. The run-of-river buildings of hydroelectric power plants and the pressure buildings of pumped storage power plants have significant similarities with each other, including the same main load-bearing reinforced concrete structures, primarily the pressure headwalls of the machine halls and the pressure shield walls with abutment against the floors. Belonging to the class of massive hydraulic structures, the pressure walls and ceilings of the machine halls of the river-bed hydroelectric power plant buildings (shield walls of pumped storage power plant buildings) consist of separate blocks separated by inter-block construction seams. Compared to monolithic structures, the weakened inter-block construction joints cause cracks that reduce the strength and operational reliability of the entire hydroelectric power plant/PSPP, making it difficult to repair using traditional methods. In order to experimentally substantiate the strengthening of reinforced concrete structures of the hydroelectric power plant with external reinforcement using composite carbon materials, a set of laboratory studies was conducted on reinforced concrete models of a fragment of the pressure wall of the machine hall of the run-of-the-river building of the hydroelectric power plant, at a scale of 1:15. Some models were without reinforcement, while others were reinforced with external reinforcement made of composite carbon tape. As a result of the laboratory studies, it was established that the system of external reinforcement from composite carbon tapes contributes to a decrease in the opening width of inter-block construction joints  $a_{(cr, III)}$  and tensile stresses in the working steel reinforcement  $\sigma_{(s, III)}$ , displacements  $f$  of the top of the models; the occurrence of tensile stresses  $\sigma_{(f)}$  in the reinforcing element (composite carbon tape); while the failure load of the reinforced model increases in comparison with the non-reinforced model. Consequently, the conducted research allowed us to experimentally substantiate the effectiveness of strengthening the pressure walls of hydroelectric power plant turbine halls with external reinforcement made of composite carbon strips. Consequently, the conducted research allowed for the experimental justification of the effectiveness of reinforcing the pressure walls of hydroelectric power plant machine rooms with external reinforcement made of composite carbon tapes.

**Keywords:** hydroelectric power plant buildings, turbine hall, pressure wall and floor, experimental research, external reinforcement, composite carbon strips

**For citation:** Rubin O.D., Aleksandrov A.V., Zhang Junhao, Balagurov V.B., Lisichkin S.E. Experimental tests of a reinforced concrete fragment of a pressure wall of a riverbed hydroelectric power plant reinforced with external reinforcement based on composite carbon tapes. *Prirodoobustrojstvo*. 2026;19(2):72-82. (In Russ.) <https://doi.org/10.26897/1997-6011-2026-2-72-82>

**Введение.** Здания русловых ГЭС размещаются в руслах рек. Напорные стены их машинных залов работают совместно с перекрытиями машинных залов, образуя основную несущую конструкцию здания ГЭС, которая воспринимает весь комплекс нагрузок.

Русловые здания ГЭС и напорные здания ГАЭС имеют значительное сходство между собой,

в том числе, одинаковые основные несущие железобетонные конструкции, в первую очередь, напорные верховые стены машинных залов и напорные щитовые стены с упором в перекрытия.

Являясь массивными гидротехническими конструкциями, напорные стены и перекрытия машинных залов русловых зданий ГЭС (щитовые стены зданий ГАЭС) состоят из отдельных

блоков, разделенных межблочными строительными швами.

Ослабленные по сравнению с монолитом, межблочные строительные швы провоцируют появление трещин, снижающих прочность и эксплуатационную надежность здания ГЭС/ГАЭС в целом, которые трудно отремонтировать традиционными способами.

С целью поддержания необходимого уровня безопасности конструкций здания ГЭС/ГАЭС проводятся как инструментальный контроль, так и поверочные расчетные исследования. В результате обосновываются и назначаются мероприятия по усилению с применением наиболее эффективной технологии – усиления композитными материалами с устройством системы внешнего армирования.

Настоящая работа является развитием способа усиления железобетонной конструкции щитовой стены Загорской ГАЭС-2 композитными углеродными лентами, необходимость которого была вызвана непроектной осадкой здания ГАЭС-2, вследствие чего в щитовой стене образовалась система трещин с шириной раскрытия до 0,9 мм [1, 2].

Был выполнен анализ следующих источников литературы.

Работа [3] посвящена исследованиям инновационного гибридного усиления (FRP) изгибаемых железобетонных конструкций (RC). Исследования показали, что гибридное FRP повысило прочность на 175%, причем приповерхностный монтаж (NSM) из углеродных ламинатов повысил прочность на 111%, но при снижении пластичности.

В работе [4] представлены данные расчетно-экспериментальных исследований железобетонных конструкций, усиленных внешним армированием из углепластика (CFRP), на действие статических нагрузок. Разрушение всех моделей определялось шириной раскрытия трещин, образованием вторичных трещин и прогибами с последующим отклеиванием углепластика при хорошем согласовании расчетных и опытных данных.

В работе [5] представлен численный анализ, согласующийся с лабораторными данными, полученными на 14-ти железобетонных моделях (RC). Результаты показали, что наклейка листов углепластика с V-образными концевыми анкерами со стороны растяжения вызвала повышение прочности примерно на 29,8%. Наклейка наклонных углепластиковых полос на боковые стороны моделей RC была весьма эффективной для повышения прочности балок на сдвиг.

В целях повышения жесткости и трещиностойкости выполнялось усиление изгибаемых железобетонных конструкций с применением предварительно напряженного листового углепластика (CFRP), приклеенного к нижней грани модели и закрепленного U-образными углепластиковыми листами на концах после натяжения [6]. Несущая способность усиленных моделей была увеличена на 41,0-88,8% и на 41,9-74,8% в предельном состоянии, а пластичность при разрушении резко снижена на 54,9-186%.

В статье [7] исследуются железобетонные (RC) колонны, усиленные снаружи армированными волокнами (FRP), при циклическом сжатии. Прогнозные характеристики предложенной модифицированной модели для прогнозирования предельной осевой деформации значительно улучшены по сравнению с другими существующими моделями. Обеспечивается прогнозирование со средним коэффициентом (AR) 0,96 и средней абсолютной ошибкой (AAE) 36,5%, что, следовательно, может способствовать более безопасному перепроектированию, в том числе сейсмостойкому перепроектированию.

В исследованиях [8] разработан и реализован точный многошаговый метод Безье для определения нелинейных колебаний и конфигураций после прогиба композитных балок Эйлера-Бернулли, армированных графеновыми нанопластинками (GnP). Установлено, что добавление относительно низкого содержания GnP резко увеличивает упругие константы композита, особенно в поперечном направлении к волокну. Кроме того, численные результаты сравниваются с результатами, полученными с помощью точных аналитических решений. Стабильность результатов свидетельствует об эффективности представленной методологии.

Усиление внешним композитным армированием железобетонных моделей (со стальной арматурой) в виде технической полиамидной (нейлоновой) ткани и стекловолокна, наклеиваемых на наружную растянутую поверхность, рассмотрено в работе [9]. При этом изменяется характер разрушения модели, повышается несущая способность на 16-38% в зависимости от материала и способа усиления.

Усиление железобетонных конструкций с поперечным армированием и без него посредством углеродных и базальтовых тканей представлено в работе [10].

Были также испытаны изгибаемые усиленные модели с поперечным армированием, частично и полностью изготовленные из инженерного цементного композита. Модели,

изготовленные из самоуплотняющегося бетона, инженерного цементного композита и их комбинации, были подготовлены и испытаны четырехточечной нагрузкой. Усиленные модели подразделялись на две группы по прочности. Первая группа включала в себя усиление на сдвиг самоуплотняющихся бетонных армированных моделей со срезом (балок без ригелей) путем рассмотрения различных конфигураций усиления с использованием обоих типов полимерных тканей, армированных волокнами. Вторая группа включала в себя усиление изгибаемых армированных наклонных балок с помощью полимерных тканей, армированных волокнами, и/или инженерного цементного композита. Наибольшее увеличение несущей способности составило 72,8% при усилении на сдвиг (первая группа), а при усилении на изгиб (вторая группа) наибольшее увеличение составило 28,8%.

В проанализированных источниках литературы [3-10] представлены новые способы усиления железобетонных конструкций композитными материалами.

**Цель исследований:** экспериментально обосновать эффективность усиления напорных стен машинных залов ГЭС внешним армированием из композитных углеродных лент.

Экспериментальные исследования, проведенные авторами статьи, представляют собой новшество, так как выполнены применительно к гидротехническому сооружению – напорному русловому зданию гидроэлектростанции. Напорные стены совместно с перекрытиями машинных залов являются основными несущими конструкциями русловых зданий ГЭС, воспринимающими все вышеуказанные нагрузки и обеспечивающими длительную эксплуатацию гидроэнергетического объекта.

Вертикальное сечение руслового здания ГЭС вдоль потока представлено на рисунке 1.

Относящиеся к классу массивных гидротехнических конструкций напорные стены и перекрытия машинных залов русловых зданий ГЭС состоят из отдельных блоков, разделенных межблочными строительными швами.

**Материалы и методы исследований.** Для экспериментального обоснования усиления железобетонных конструкций ГЭС внешним армированием с применением композитных углеродных материалов проведен комплекс лабораторных исследований железобетонных моделей фрагмента напорной стены машинного зала руслового здания ГЭС в масштабе 1:15.

Высота железобетонных моделей составляла 140 см, поперечное сечение – 27 × 30 см,

рабочее армирование – 3Ø12A500C, коэффициент армирования  $\mu_s = 0,00471$ , класс бетона – B25.

Опытная модель 1 не имела усиления (рис. 2.а); модель 2-1 была усилена внешним армированием из композитной углеродной ленты в опорной части (рис. 2.б), модель 2-2 была усилена внешним армированием из композитной углеродной ленты в опорной части и на растянутой грани (рис. 2.в). Модели 1, 2-1 и 2-2 были испытаны при соотношении  $M/Qh_0 = 4,17$  [11].

Опытная модель 3-1 была усилена внешним армированием из композитной углеродной ленты в опорной части (рис. 3.а); модель 3-2 была усилена внешним армированием из композитной углеродной ленты в опорной части и на растянутой грани, а также в поперечном направлении (рис. 3.б). Модели 3-1 и 3-2 были испытаны при соотношении  $M/Qh_0 = 3,3$  [11].

При ослаблении межблочными строительными швами по сравнению с монолитом в конструкциях возникают трещины по межблочным строительным швам, снижающие прочность и эксплуатационную надежность здания ГЭС в целом, которые трудно отремонтировать традиционными способами. В связи с этим представляется необходимым провести комплекс экспериментальных исследований с усилением конструкций композитными углеродными лентами.

Усиление опытных моделей выполнялось композитной углеродной лентой типа FibArm

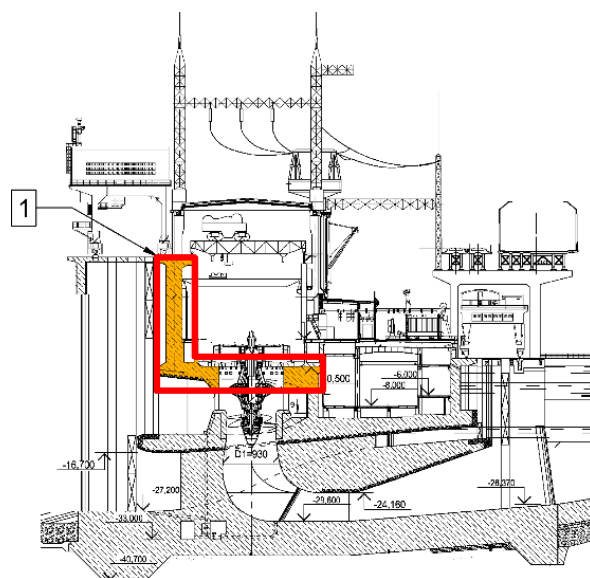


Рис. 1. Вертикальное сечение руслового здания ГЭС:

1 – напорная стена совместно с перекрытием машинного зала ГЭС

Fig. 1. Vertical section of the channel HPP building:

1 – pressure wall together with the ceiling of the turbine hall of the HPP

530/300 (аналог применяемой при усилении щитовой стены Загорской ГАЭС-2).

В экспериментальных исследованиях железобетонных моделей фрагмента напорной стены машинного зала ГЭС решалась задача по определению прочности не усиленной и усиленной композитными углеродными лентами конструкции, ширины раскрытия межблочных строительных швов, напряжений в рабочей стальной арматуре и в композитных углеродных лентах усиления внешним армированием; описывалась эффективность усиления моделей фрагментов напорной стены.

Экспериментальные исследования выполнялись в лаборатории филиала АО «Институт Гидропроект» – «НИИЭС» на железобетонных моделях фрагмента напорной стены.

Использовались:

1. Специализированный силовой металлический стенд на максимальную нагрузку 1000 кН.

2. Домкрат гидравлический (создание статической нагрузки) ДГ-50

- создаваемое усилие – 500 кН;
- величина выдвигания штока (длина хода) – 60 мм;
- рабочее давление – 45,5 МПа.

3. Гидравлическая насосная станция MP700 ENERPAC

- номинальное давление – 70,0 МПа;
- величина выдвигания штока (длина хода) – 26,5 мм.

Измерительное оборудование:

1. Тензорезисторы TML FLA-10-350-21

Тензорезисторы TML FLA-10-350-21 предназначены для измерения деформаций конструкций при статических и динамических нагрузках, а также для применения в качестве чувствительных элементов первичных преобразователей различных физических величин. Тензорезисторы TML FLA-10-350-21 с базой 10 мм сопротивлением 350 Ом.

Предельное относительное отклонение сопротивления в партии от номинального составляет  $\pm 1,0\%$ .

Номер в государственном реестре средств измерений (ФГИС «АРШИН») – 79148-20.

2. Индикаторы часового типа 1МИГ 0-10,001 ЧИЗ

Тензометры на базе индикаторов часового типа 1МИГ 0-10,001 ЧИЗ представляют собой высокоточный измерительный инструмент, применяемый для измерений линейных размеров, в том числе деформаций, а также отклонения их

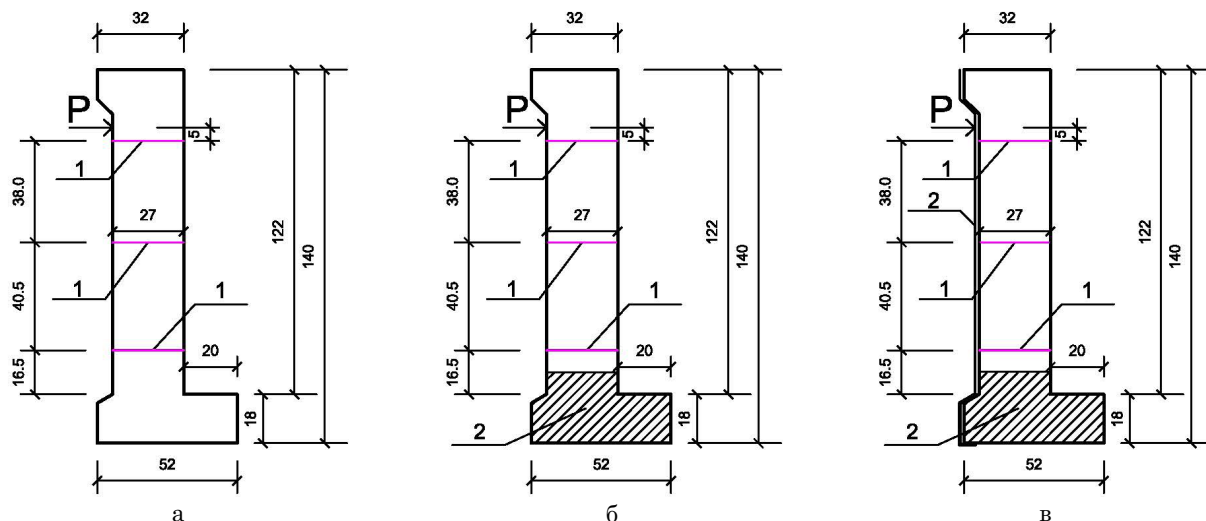


Рис. 2. Опытные модели фрагмента напорной стены машинного зала руслового здания ГЭС, см:

1 – межблочные строительные швы; 2 – композитная углеродная лента; а) модель без усиления (1);

б) модель (2-1), усиленная композитной углеродной лентой в опорной части;

в) модель (2-2), усиленная композитной углеродной лентой в опорной части и на растянутой грани;

P – опытная сосредоточенная сила, приложенная на высоте 118 см от низа моделей (вариант 1), при соотношении  $M/Qh_0 = 4.17$

Fig. 2. Experimental models of a fragment of the pressure wall of the turbine hall of the channel building of the HPP

(dimensions are given in cm): 1 – interblock construction seams; 2 – composite carbon tape;

a) Model without reinforcement (1); б) model (2-1), reinforced with composite carbon tape in the supporting part; c) model (2-2), reinforced with composite carbon tape in the supporting part and on the stretched edge;

P – is the experimental concentrated force attached at a height of 118 cm from the bottom of the models (option 1) at  $M/Qh_0 = 4.17$

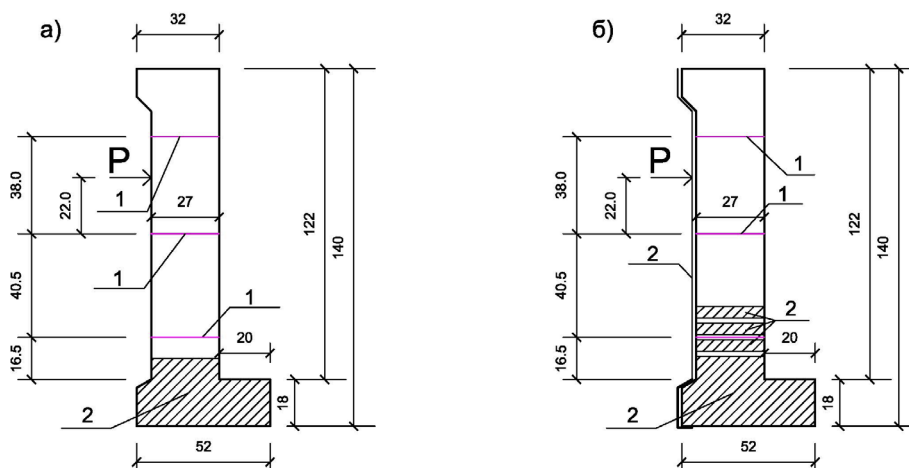


Рис. 3. Опытные модели фрагмента напорной стены машинного зала руслового здания ГЭС, см:

1 – межблочные строительные швы; 2 – композитная углеродная лента;

а) модель (3-1), усиленная композитной углеродной лентой в опорной части;

б) модель (3-2), усиленная композитной углеродной лентой в опорной части, на растянутой грани и поперечными композитными углеродными лентами; P – опытная сосредоточенная сила, приложенная на высоте 98 см от низа моделей (вариант 2), при соотношении  $M/Qh_0 = 3.3$

Fig. 3. Experimental models of a fragment of the pressure wall of the turbine hall of the HPP channel building (dimensions are given in cm):

1 – interblock seams; 2 – carbon tape; а) model (3-1), reinforced with carbon tape in the supporting part;

б) model (3-2), reinforced with carbon tape in the supporting part, on the stretched edge and transverse bands;

P is the experimental concentrated force (located 22 cm above the middle seam (option 2) at  $M/Qh_0 = 3.3$

размеров от заданного диапазона. Применяется совместно с дополнительным оборудованием – таким, как штативы, скобы и разнообразные подставки. Погрешность измерительного устройства находится в пределах 10-15 мкм.

Наибольшая погрешность измерений: 2,0 мкм, цена деления – 0,001 мм.

Номер в государственном реестре средств измерений (ФГИС «АРИИ») – 49140-12.

3. Тензометрическая станция TSG-S01-32.

Номер в Госреестре средств измерений – 79484-20 (5) (табл. 1).

**Результаты и их обсуждение.** При проведении экспериментальных исследований моделей железобетонного фрагмента напорной стены машинного зала руслового здания ГЭС (рис. 2, 3), изготовленных без усиления и с усилением внешним армированием из композитной углеродной ленты, были получены результаты, представленные в виде графиков на рисунках 4-10.

Как показывают результаты экспериментальных исследований, усиление системой внешнего армирования из композитных углеродных лент существенно повлияло на измеряемые

Таблица 1. Параметры тензометрической станции TSG-S01-32

Table 1. Parameters of the TSG-S01-32 load cell station

| № п.п. | Характеристики / Characteristics                                                                                                                       | Тензометрическая станция TSG-S01-32 / Strain gauge station TSG-S01-32 |
|--------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------|
| 1      | Количество измерительных каналов / Number of measuring channels                                                                                        | 32                                                                    |
| 2      | Схемы включения тензорезисторов / Strain Gauge activation diagrams                                                                                     | мост, полумост, четвертьмост / bridge, half-bridge, quarter bridge    |
| 3      | Номинальное сопротивление тензорезисторных преобразователей / Nominal resistance of strain gauge transducers                                           | 50-1000 Ом                                                            |
| 4      | Диапазоны измерений коэффициента преобразования / Conversion ratio measurement ranges                                                                  | $\pm 5; \pm 10$ мВ/В                                                  |
| 5      | Пределы допускаемой относительной погрешности измерений частоты колебаний / Limits of permissible relative error of oscillation frequency measurements | $\pm 5 \cdot 10^{-5}$                                                 |
| 6      | Внешние интерфейсы / External interfaces                                                                                                               | RS-485, USB; Bluetooth                                                |

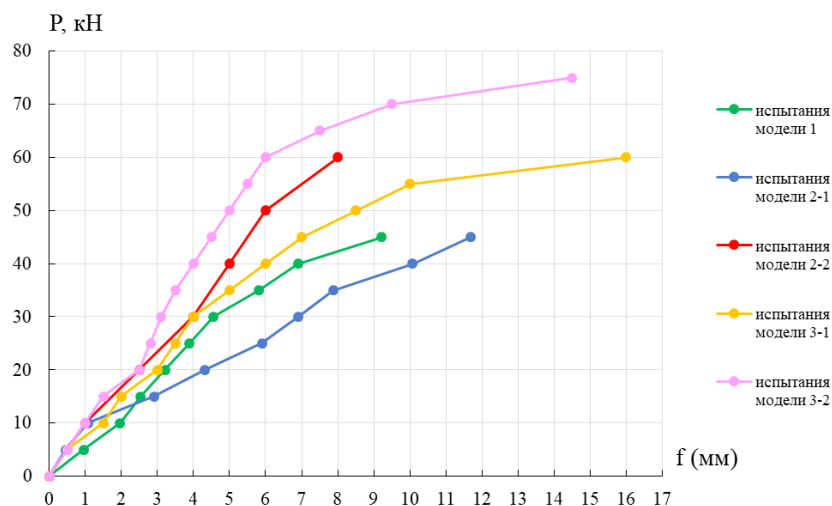


Рис. 4. Графики перемещений верха моделей 1, 2-1, 2-2, 3-1, 3-2

Fig. 4. Schedules of movement of the top of models 1, 2-1, 2-2, 3-1, 3-2

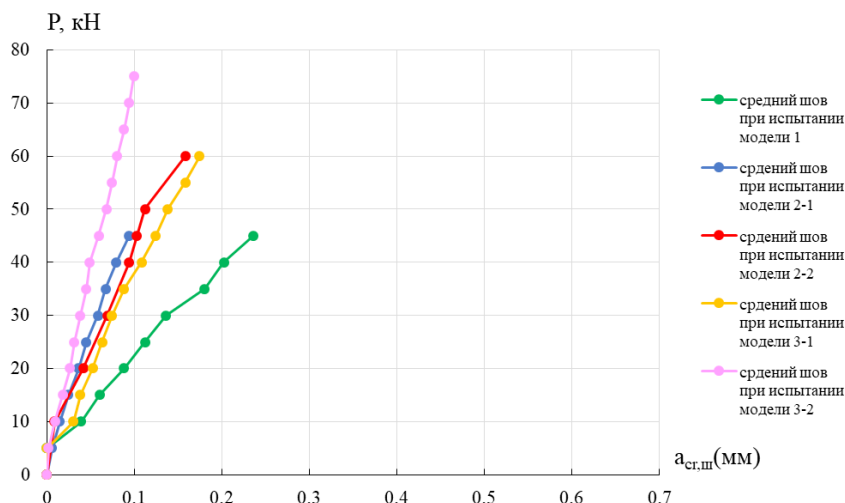


Рис. 5. Графики ширины раскрытия межблочных строительных швов (средний шов) при испытании моделей 1, 2-1, 2-2, 3-1, 3-2

Fig. 5. Graphs of the width of the opening of interblock construction joints (middle seam) when testing models 1, 2-1, 2-2, 3-1, 3-2

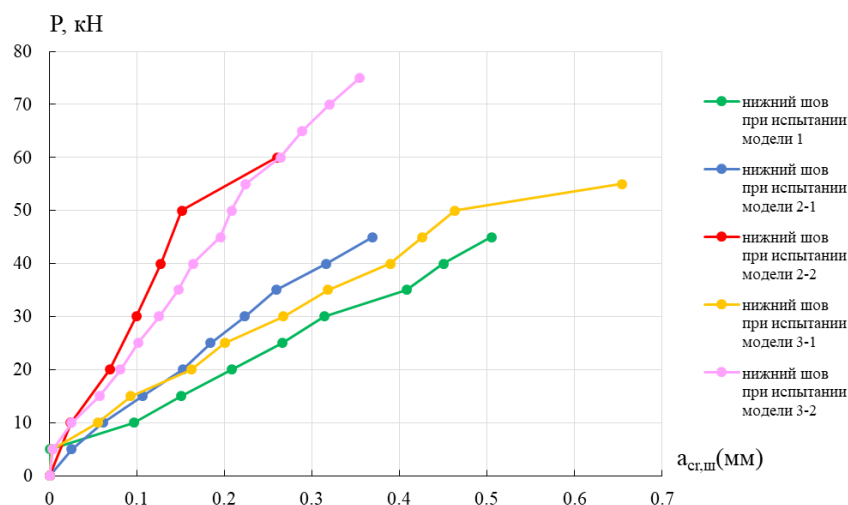


Рис. 6. Графики ширины раскрытия межблочных строительных швов (нижний шов) при испытании моделей 1, 2-1, 2-2, 3-1, 3-2

Fig. 6. Graphs of the width of the opening of interblock construction joints (bottom seam) when testing models 1, 2-1, 2-2, 3-1, 3-2

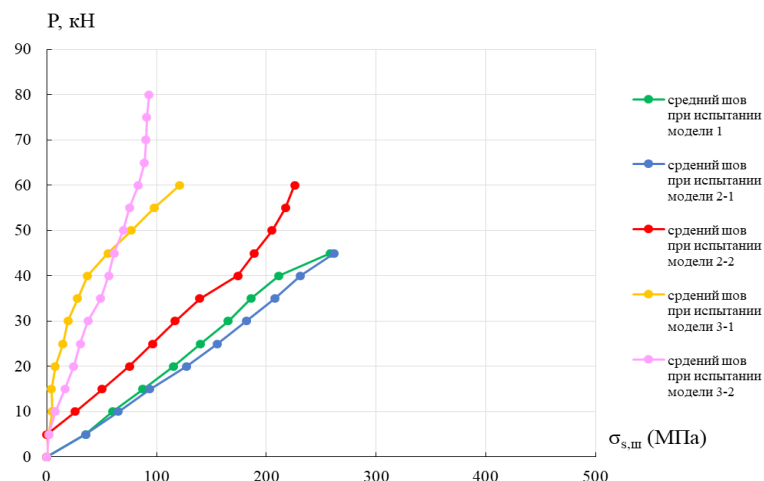


Рис. 7. Графики растягивающих напряжений в рабочей стальной арматуре в среднем шве: модели 1, 2-1, 2-2, 3-1, 3-2

Fig. 7. Graphs of tensile stresses in working steel reinforcement in the middle joint: models 1, 2-1, 2-2, 3-1, 3-2

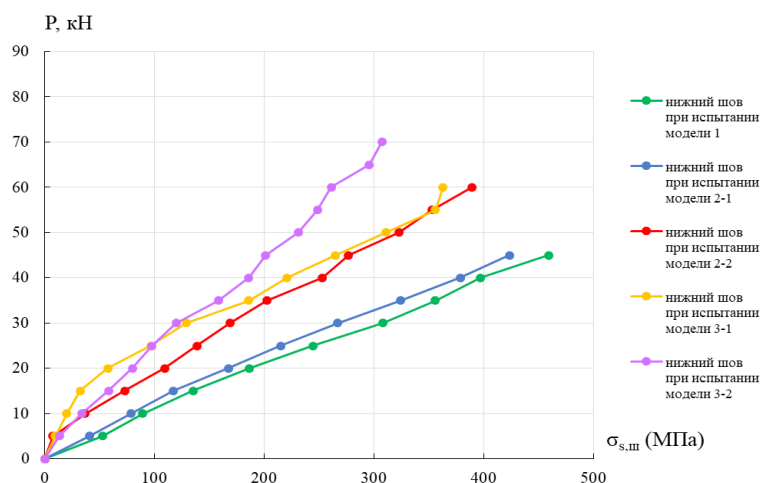


Рис. 8. Графики растягивающих напряжений в рабочей стальной арматуре в нижнем шве: модели 1, 2-1, 2-2, 3-1, 3-2

Fig. 8. Graphs of tensile stresses in working steel reinforcement in the bottom joint: models 1, 2-1, 2-2, 3-1, 3-2, 3-1, 3-2

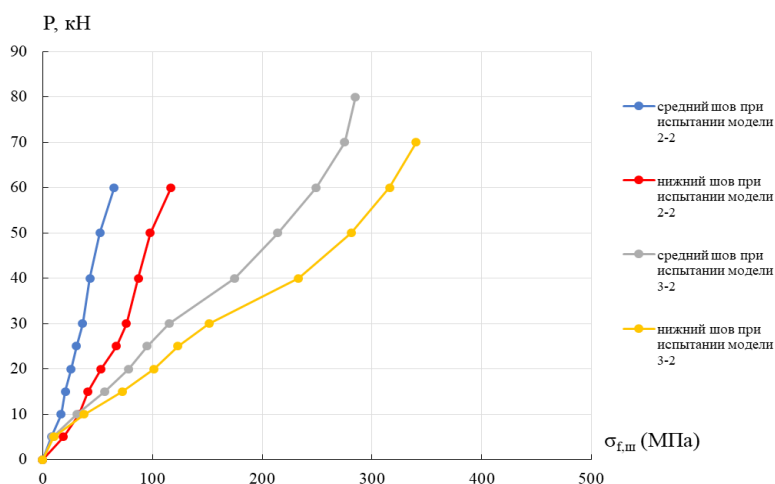


Рис. 9. Графики растягивающих напряжений в композитной углеродной ленте на растянутой грани на уровне межблочных строительных швов моделей 2-2, 3-2

Fig. 9. Graphs of tensile stresses in composite carbon tape on a tensile face at the level of interblock construction seams of models 2-2, 3-2

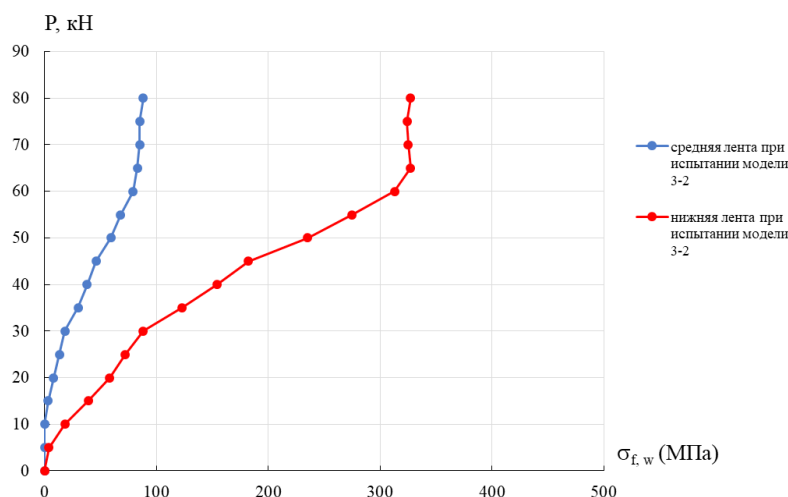


Рис. 10. Графики растягивающих напряжений в средней и нижней поперечных композитных углеродных лентах модели 3-2

Fig. 10. Graphs of tensile stresses in the middle and lower transverse composite carbon tapes of model 3-2

величины: уменьшились ширина раскрытия межблочных строительных швов  $a_{cr,ш}$ , напряжения в растянутой рабочей стальной арматуре  $\sigma_{s,ш}$  и перемещения  $f$  верха моделей; максимальные напряжения растяжения в композитной углеродной ленте достигали 340 МПа.

Необходимо отметить, что в результате усиления композитными углеродными лентами моделей (рис. 2.в, 3.б) полностью восстановлена несущая способность, полученная при испытаниях (рис. 2.а, 2.б, 3.а), дополнительно увеличившись на 33%. Это подтверждает эффективность системы внешнего армирования.

Экспериментальные исследования моделей напорной стены указывают на специфику работы железобетонных конструкций с межблочными строительными швами «строительный шов – наклонная трещина». В качестве примера на рисунке 11 представлен снимок фрагмента опытной модели.



Рис. 11. Экспериментальные исследования опытной модели напорной стены – «трещина по строительному шву-наклонная трещина»

Fig. 11. Experimental studies of an experimental model of a pressure wall – “construction seam crack-slanting crack”

### Выводы

1. Русловые здания ГЭС и напорные здания ГАЭС имеют значительное сходство между собой, в том числе, одинаковые основные несущие железобетонные конструкции, в первую очередь, напорные верховые стены машинных залов и напорные щитовые стены с упором в перекрытия.

2. В результате проведения экспериментальных исследований моделей фрагментов напорной стены руслового здания ГЭС (основной, воспринимающей нагрузки, конструкции в системе «напорная стена – железобетонное перекрытие» машинного зала ГЭС) выявлен характер трещинообразования с раскрытием межблочных

строительных швов и разрушения в опорной части по схеме «межблочный шов – наклонная трещина». В усиленной модели фрагмента напорной стены (в сравнении с не усиленной моделью) установлено снижение ширины раскрытия межблочных строительных швов и снижение напряжений в рабочей стальной арматуре, а также повышение несущей способности на 33%.

3. Выявлена совместная работа железобетонных моделей, усиленных системой внешнего армирования с растягивающими напряжениями в композитной углеродной ленте  $\sigma_{f,ш}$  на растянутой грани до 340 МПа и в поперечном направлении  $\sigma_f$  до 330 МПа.

4. Эффективность усиления напорной стены машинного зала руслового здания ГЭС внешним армированием с применением композитных углеродных лент была экспериментально обоснована.

5. Область применения усиления железобетонных конструкций системами внешнего

армирования с использованием композитных углеродных лент была расширена вплоть до использования в конструкциях ГЭС/ГАЭС на основе результатов проведенного комплекса экспериментальных исследований.

#### Список использованных источников

1. Александров А.В., Зерцалов М.Г., Баклыков И.В., Смирнова М.А., Чжан Ц. «Анализ напряженно-деформированного состояния напорной стены здания гидроаккумулирующей электростанции при проектировании усиления прибетонкой и композитами» / Мелиорация и гидротехника. 2025. Т. 15, № 4. С. 317-337.
2. Александров А.В. «Выравнивание здания Загорской ГАЭС-2» // Гидротехника 4(64). 2020. С. 10-13.
3. Chellapandian M., Prakash S.S., Sharma A. Experimental and finite element studies on the flexural behaviour of reinforced concrete elements strengthened with hybrid FRP technique // Composite Structures. 2019. Vol. 208. Design and Experimental Studies of Strengthening of Backwater Type Hydraulic Structures with Composite Materials International Journal for Computational Civil and Structural Engineering 466-478. DOI: 10.1016/j.compstruct.2018.10.028.
4. Samarakoon S.M.S.M.K., Piatek B., De Silva G.H.M.J.S. Investigation of the Flexural Behavior of Preloaded and Pre-Cracked Reinforced Concrete Beams Strengthened with CFRP Plates. Materials. 2023, 16, 22. <https://doi.org/10.3390/ma16010022>
5. Uz M.E., Guner Y., Avci E. Strengthening of Reinforced Concrete Beams with CFRP Orientation. Buildings. 2024, 14, 82. <https://doi.org/10.3390/buildings14010082>
6. Wang H., Li C., Song S., Wang Y., Meng Q., Li F. Flexural Performance of Cracked Reinforced Concrete Beams Strengthened with Prestressed CFRP Sheets under Repeated Loads. Buildings 2023, 13, 2115. <https://doi.org/10.3390/buildings13082115>
7. Fanaradelli T.D., Rousakis T.C. Prediction of ultimate strain for rectangular reinforced concrete columns confined with fiber reinforced polymers under cyclic axial compression. Polymers. 2020, 12, 2691. <https://doi.org/10.3390/polym12112691>
8. Kabir H., Aghdam M.M. A robust Bézier based solution for nonlinear vibration and post-buckling of random checkerboard graphene nano-platelets reinforced composite beams. Composite Structures. 2019. Vol. 212. Pp. 184-198. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2019.01.041>
9. Volik A., Novitski Y. Strengthening of tensile zone of the reinforced concrete beams with composite fabrics. Research, Design & Cad in Construction: Theory and Practice (RD-CAD2021). Vol. 350. MATEC Web of Conferences. Brest: Republic of Belarus, 2021. October 29. Pp. 1-5. DOI: 10.1051/mateconf/202135000019.
10. Farqad Qays Ibrahim. Strengthen Strategies for Reinforced Concrete Haunched Beams Using Fibre Reinforced Polymer Fabric and Engineered Cementitious Composites. Periodicals of Engineering and Natural Sciences. Vol. 9. № 3. July. 2021. Pp. 41-61.
11. СП 41.13330.2012. Бетонные и железобетонные конструкции гидротехнических сооружений. Актуализированная редакция СНиП 2.06.08-87. М., 2012. 40 с.

#### References

1. Alexandrov A.V., Zertsalov M.G., Baklykov I.V., Smirnova M.A., and Zhang Ts. "Analysis of the Stress-Strain State of the Pressure Wall of a Hydroelectric Power Plant Building during the Design of Reinforcement with Concrete and Composites" / Melioration and Hydraulic Engineering. 2025. Vol. 15, No. 4. Pp. 317-337.
2. Alexandrov A.V. "Leveling the Zagorskaya HPP-2 Building" // Hydrotechnics 4(64). 2020. Pp. 10-13.
3. Chellapandian M., Prakash S.S., Sharma A. Experimental and finite element studies on the flexural behaviour of reinforced concrete elements strengthened with hybrid FRP technique // Composite Structures. 2019. Vol. 208. Pp. Design and Experimental Studies of Strengthening of Backwater Type Hydraulic Structures with Composite Materials International Journal for Computational Civil and Structural Engineering 466-478. DOI: 10.1016/j.compstruct.2018.10.028.
4. Samarakoon S.M.S.M.K.; Piatek B.; De Silva G.H.M.J.S. Investigation of the Flexural Behavior of Preloaded and Pre-Cracked Reinforced Concrete Beams Strengthened with CFRP Plates. Materials 2023, 16, 22. <https://doi.org/10.3390/ma16010022>
5. Uz, M.E.; Guner Y.; Avci E. Strengthening of Reinforced Concrete Beams with CFRP Orientation. Buildings. 2024, 14, 82. <https://doi.org/10.3390/buildings14010082>
6. Wang H.; Li, C.; Song S.; Wang Y.; Meng Q.; Li, F. Flexural Performance of Cracked Reinforced Concrete Beams Strengthened with Prestressed CFRP Sheets under Repeated Loads. Buildings 2023, 13, 2115. <https://doi.org/10.3390/buildings13082115>
7. Fanaradelli T.D.; Rousakis T.C. Prediction of ultimate strain for rectangular reinforced concrete columns confined with fiber reinforced polymers under cyclic axial compression. Polymers. 2020, 12, 2691. <https://doi.org/10.3390/polym12112691>
8. Kabir H., Aghdam M.M. A robust Bézier based solution for nonlinear vibration and post-buckling of random checkerboard graphene nano-platelets reinforced composite beams. Composite Structures. Vol. 212, pp. 184-198. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2019.01.041>
9. Volik A., Novitski Y. Strengthening of tensile zone of the reinforced concrete beams with composite fabrics. Research, Design & Cad in Construction: Theory and Practice (RD-CAD2021). Vol. 350: MATEC Web of Conferences. Brest, Republic of Belarus, October 29, 2021. – Brest: [s. n.], 2021. – Pp. 1-5. DOI: 10.1051/mateconf/202135000019.
10. Farqad Qays Ibrahim. Strengthen Strategies for Reinforced Concrete Haunched Beams Using Fibre Reinforced Polymer Fabric and Engineered Cementitious Composites. Periodicals of Engineering and Natural Sciences. Vol. 9, No. 3, July 2021, pp. 41-61.
11. SP 41.13330.2012. Concrete and reinforced concrete structures of hydraulic structures. Updated edition of SNiP 2.06.08-87. Moscow, 2012, 40 p.

**Информация об авторах**

**Олег Дмитриевич Рубин**, д-р техн. наук, профессор; профессор НИУ МГСУ, SPIN-код: 2720-6627, AuthorID:423001, Scopus 7004427140, ResearcherID AAE-6688-2022, ORCID: 0000-0002-0630-3251; rubinod@niies.ru

**Андрей Викторович Александров**, канд. техн. наук; начальник отдела АО «Институт Гидропроект», SPIN-код: 4152-5972, AuthorID: 1206829; a.aleksandrov@hydroproject.ru

**Чжан Цзюньхао**, аспирант НИУ МГСУ; ORCID: 0009-0006-0490-210X; weiw0951@gmail.com

**Владимир Борисович Балагуров**, инженер, начальник отдела филиала АО «Институт Гидропроект» – «НИИЭС»; v.balagurov@hydroproject.ru

**Сергей Евгеньевич Лисичкин**, д-р техн. наук, главный специалист филиала АО «Институт Гидропроект» – «НИИЭС», SPIN-код: 5423-0643, AuthorID:368472, Scopus 660391907, ORCID: 0000-0003-2761-331X; lisichkin1989@rambler.ru

**Author information**

**Oleg D. Rubin**, DSc (Eng), professor; Professor of the National Research University MGSU; SPIN-code: 2720-6627, AuthorID: 423001, Scopus 7004427140, ResearcherID AAE-6688-2022, ORCID: 0000-0002-0630-3251; rubinod@niies.ru

**Andrey V. Aleksandrov**, CSc (Eng); head of the department, JSC "Institute Hydroproject", SPIN-code: 4152-5972, AuthorID: 1206829; a.aleksandrov@hydroproject.ru

**Zhang Junhao**, postgraduate student of the National Research University MGSU ORCID: 0009-0006-0490-210X; weiw0951@gmail.com

**Vladimir B. Balagurov**, Engineer, head of the department, Branch of JSC "Institute Hydroproject" – "NIIES", v.balagurov@hydroproject.ru

**Sergey E. Lisichkin**, DSc (Eng), Chief expert, Branch of JSC "Institute Hydroproject" – "NIIES", SPIN-code: 5423-0643, AuthorID:368472, Scopus 660391907, ORCID: 0000-0003-2761-331X; lisichkin1989@rambler.ru

**Вклад авторов**

О.Д. Рубин – концептуализация, руководство экспериментальными исследованиями, анализ результатов экспериментов и формирование выводов.

А.В. Александров – участие в анализе результатов экспериментов, формирование выводов, редактирование рукописи.

Чжан Цзюньхао – участие в проведении экспериментов, обработке результатов, построении графиков.

В.Б. Балагуров – изготовление опытных моделей к проведению экспериментов, участие в проведении экспериментов.

С.Е. Лисичкин – участие в проведении экспериментов, анализе результатов экспериментов и формирование выводов, редактирование рукописи.

**Конфликт интересов / Conflict of interests**

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов / The authors declare no conflict of interests

Поступила в редакцию / Received 04.09.2025

Поступила после рецензирования / Received 27.11.2025

Принята к публикации / Accepted 17.12.2025

**Contribution of the authors**

O.D. Rubin – conceptualization, management of experimental research, analysis of experimental results and formation of conclusions.

A.V. Aleksandrov – participation in the analysis of experimental results, formation of conclusions, editing the manuscript.

Zhang Junhao – conducting experiments, processing results, plotting graphs.

V.B. Balagurov – manufacturing experimental models for conducting experiments, participation in conducting experiments.

S.E. Lisichkin – participation in conducting experiments, analysis of experimental results and formation of conclusions, processing results, editing the manuscript.