

О.Д. РУБИН¹, С.Е. ЛИСИЧКИН¹, К.Е. ФРОЛОВ², Ф.А. ПАЩЕНКО³, О.В. ЗЮЗИНА⁴

¹ Филиал Акционерного общества «Проектно-изыскательский и научно-исследовательский институт «Гидропроект им. С.Я. Жука» – «Научно-исследовательский институт энергетических сооружений», г. Москва, Российская Федерация

² Акционерное общество «Русатом. Автоматизированные системы управления», г. Москва, Российская Федерация

³ Акционерное общество «Проектно-изыскательский и научно-исследовательский институт воздушного транспорта «Ленаэропроект», г. Санкт-Петербург, Российская Федерация

⁴ Акционерное общество «Всероссийский научно-исследовательский институт гидротехники имени Б.Е. Веденеева», г. Санкт-Петербург, Российская Федерация

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ПОДПОРНЫХ СТЕН

Подпорные стенки являются одними из наиболее распространенных сооружений гидроузлов. Большинство железобетонных подпорных стенок длительное время находится в эксплуатации. По разным причинам (в том числе из-за неполного учета всех особенностей таких сооружений при их проектировании, строительстве и эксплуатации), в ряде случаев потребовалось их усиление. Одним из способов усиления подпорных стенок является устройство анкерных тяг, удерживающих верх стенок от смещения в направлении от грунтовой засыпки. В последние годы получил распространение способ усиления железобетонных конструкций различного назначения путем дополнительного внешнего армирования с применением композитных материалов из углеродного волокна. С учетом характерных особенностей массивного гидротехнического железобетона была изготовлена железобетонная модель подпорной стенки уголкового типа, усиленная анкерной тягой и углеродной лентой. При этом элемент усиления – углеродная лента – наклеивалась вертикально на лицевую грань модели. Для контроля за состоянием железобетонной модели в ходе экспериментов устанавливалась контрольно-измерительная аппаратура. Экспериментальные исследования проводились на специально оборудованном силовом стенде. В результате испытаний определялись перемещение верха модели, ширина раскрытия горизонтальных межблочных швов и выклинившихся из швов наклонных трещин, усилие в анкерной тяге, нагрузка разрушения модели. При анализе полученных результатов определялось повышение прочности железобетонной модели, усиленной углеродной композитной лентой. Таким образом, было получено повышение прочности железобетонной модели подпорной стенки в 1,27 раза за счет применения углеродной композитной ленты.

Гидротехнические сооружения; железобетонные подпорные стенки; усиление конструкций; анкерные тяги; внешнее армирование; углеродные композитные ленты; экспериментальные исследования; железобетонные модели.

Введение. Подпорные стенки (в том числе, уголкового типа) распространены на гидроузлах [1-4]. Существующие методы расчета не в полной мере учитывают все характерные особенности подпорных стенок, что вызывает отклонения в их работе, требующие усиления таких конструкций [5-8]. Для длительно эксплуатируемых железобетонных подпорных стенок, в ряде случаев, применяются анкерные тяги [9, 10]. Применение анкерных тяг, с одной стороны, предотвращает смещение верха стенок, однако, с другой стороны, изменяет схему работы стенок; вследствие чего на лицевой грани, где установлена вертикальная конструктивная арматура, возникает вертикальное растяжение, и указанная конструктивная арматура вынуждена выполнять функцию рабочей арматуры, для чего ее количества

недостаточно. При этом требуется усиление лицевой грани стенок (например, внешним армированием из композитных материалов).

Также находит широкое применение в промышленном и гражданском строительстве усиление железобетонных конструкций внешним армированием из композитных материалов, однако в гидротехнике такое усиление практически не применялось [11-14]. В этой связи потребовалось проведение экспериментальных исследований усиления гидротехнических подпорных стенок анкерными тягами и композитными углеродными тканями.

Материалы и методы. Для моделирования были приняты параметры и очертания железобетонных подпорных стен, характерные для низовой подпорной стенки ЛН-2 водоприемника Загорской ГАЭС, отличающиеся значительными габаритами,

сравнительно невысокими классами бетона и процентами армирования. Так вертикальная консольная часть подпорной стенки ЛН-2 имеет высоту 17,16 м; толщину в корневом сечении 4,0 м; толщину верхней части 1,0 м; процент рабочего армирования у тыловой грани 0,39%. Горизонтальные анкерные тяги располагаются на отметке на 5,76 м ниже верха стенки [2-5].

Была разработана модель подпорной стенки ЛН-2 водоприемника Загорской ГАЭС в масштабе М1:12, соответственно высотой 143 см, шириной 30 см; размеры поперечного сечения в корневом сечении составили 33×30 см. По высоте моделировалось 3 горизонтальных межблочных шва. Рабочее армирование модели у тыловой наклонной грани принималось по аналогии с армированием подпорных стенок водоприемника Загорской ГАЭС в виде 3-х диаметров 12 мм из арматуры класса А-III. Конструктивное армирование у лицевой грани принималось в виде одного диаметра 12 мм из арматуры класса А-III. Бетон модели был класса В25. В модели воспроизводилась горизонтальная анкерная тяга в виде стержня диаметром 12 мм из стали Ст. 3, расположенная на 48 см ниже верха модели (рис. 1).

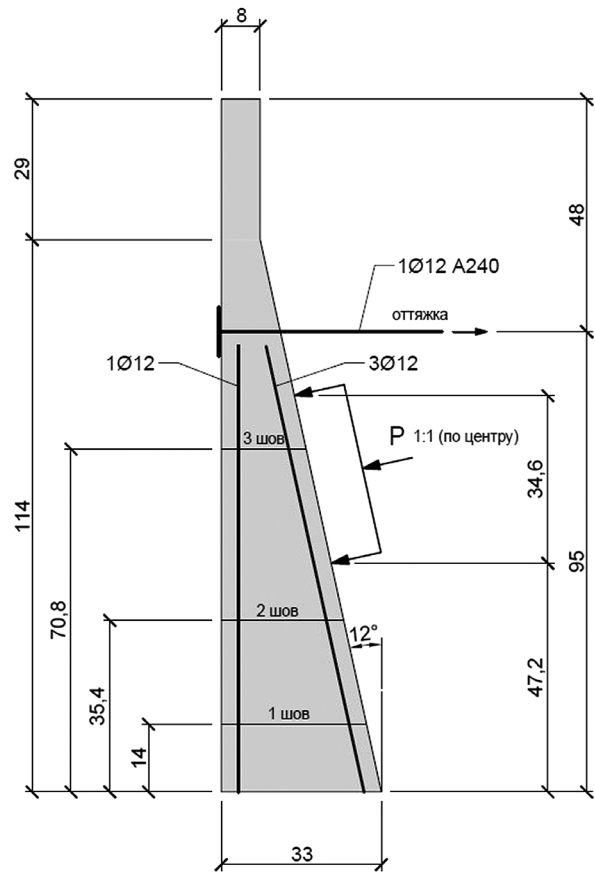


Рис. 1. Схема модели на этапе 1 испытаний (размеры даны в см)

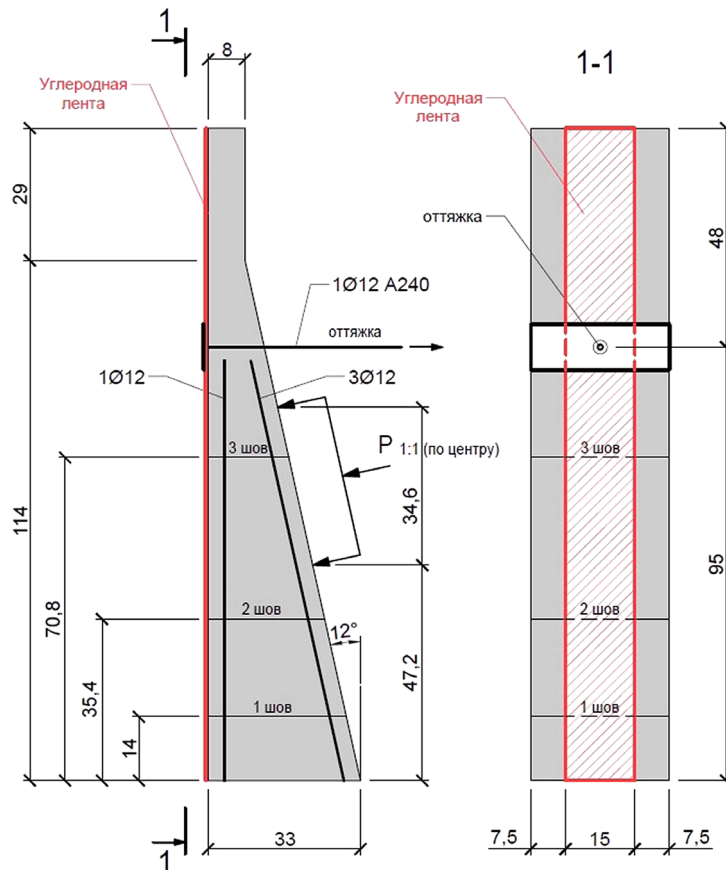


Рис. 2. Схема модели на этапе 2 испытаний (размеры даны в см)

Усиление модели подпорной стенки выполнялось углеродными композитными лентами типа FibArmTape 530/300. Углеродная

лента шириной 150 мм наклеивалась на лицевую грань модели. Схема модели на этапе 2 испытаний представлена на рисунке 2.

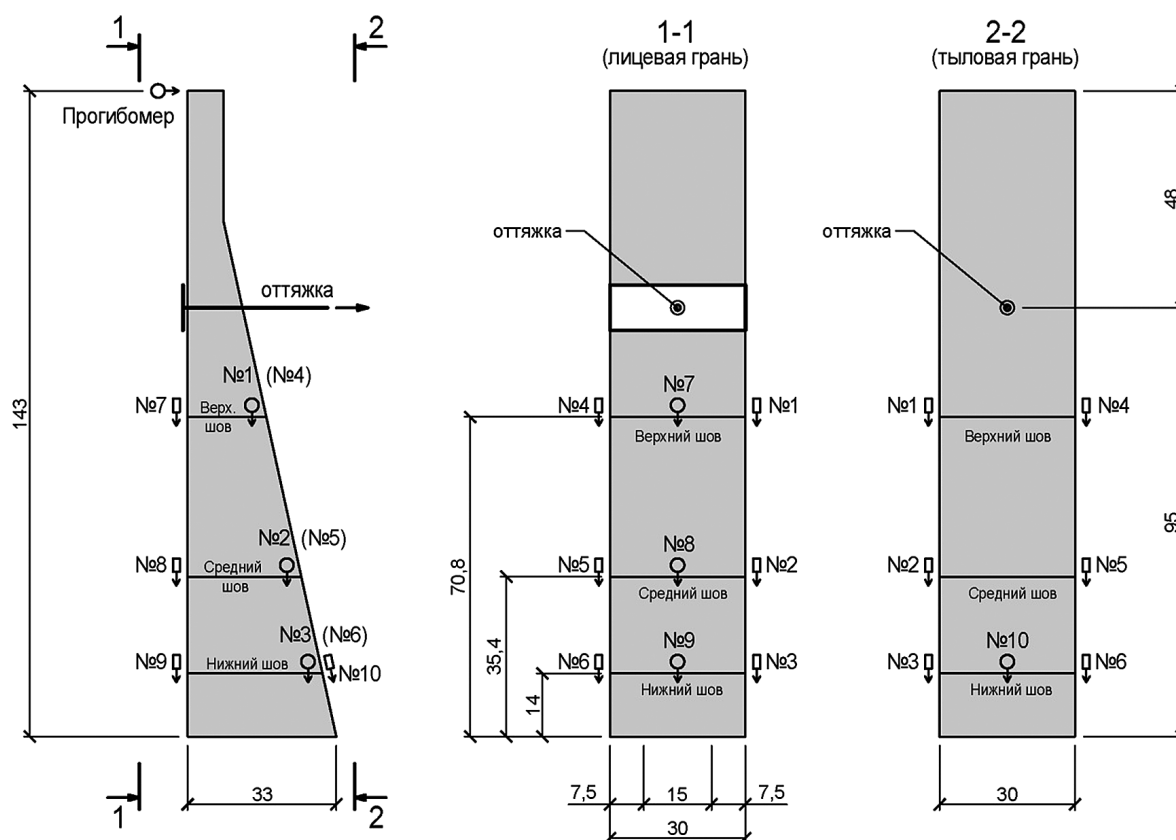


Рис. 3. Схема установки КИА на этапе 1 испытаний (размеры даны в см)

В целях наблюдений за величинами перемещений верха модели, шириной раскрытия горизонтальных межблочных швов и наклонных трещин в процессе экспериментов производилось оснащение контрольно-измерительной аппаратурой (КИА), схемы установки которой представлены на рисунках 3 и 4. Трещинообразование в модели регистрировалось с помощью микроскопа МПБ-3.

В ходе испытаний силовая нагрузка прикладывалась посредством гидродомкрата и передавалась на тыловую грань модели через траверсу, расположенную параллельно тыловой грани модели. Опытная нагрузка прикладывалась ступенями, составляющими 10% от разрушающей нагрузки, при этом на каждом этапе нагружения модели делалась выдержка не менее 15 мин., после чего снимались показания приборов.

Результаты и обсуждение. На этапе 1 проводилось испытание модели подпорной стенки, усиленной анкерной тягой. На этапе 2 проводилось испытание модели подпорной стенки, усиленной углеродной

лентой на лицевой грани и анкерной тягой. Виды модели в процессе испытания на этапах 1 и 2 представлены на фото (рис. 5).

Полученные в ходе экспериментальных исследований железобетонных моделей подпорных стенок результаты показали, что разрушение железобетонной модели, усиленной анкерной тягой, на этапе 1 произошло при нагрузке 45,76 кН. Максимальное перемещение верха модели составило 2,14 мм. Раскрытие нижнего горизонтального шва со стороны тыловой грани составило 0,18 мм; среднего горизонтального шва со стороны лицевой грани – 0,20 мм; верхнего горизонтального шва со стороны лицевой грани – 0,51 мм (соответствующие графические зависимости на рисунке 6). Максимальное раскрытие наклонной трещины вдоль тыловой арматуры из среднего шва составило 0,45 мм (1-я трещина); наклонной трещины по лицевой арматуре из среднего шва – 0,55 мм (2-я трещина); наклонной трещины из нижнего шва – 0,6 мм (3-я трещина) (рис. 7). Усилие в анкерной тяге составило 28,02 кН.

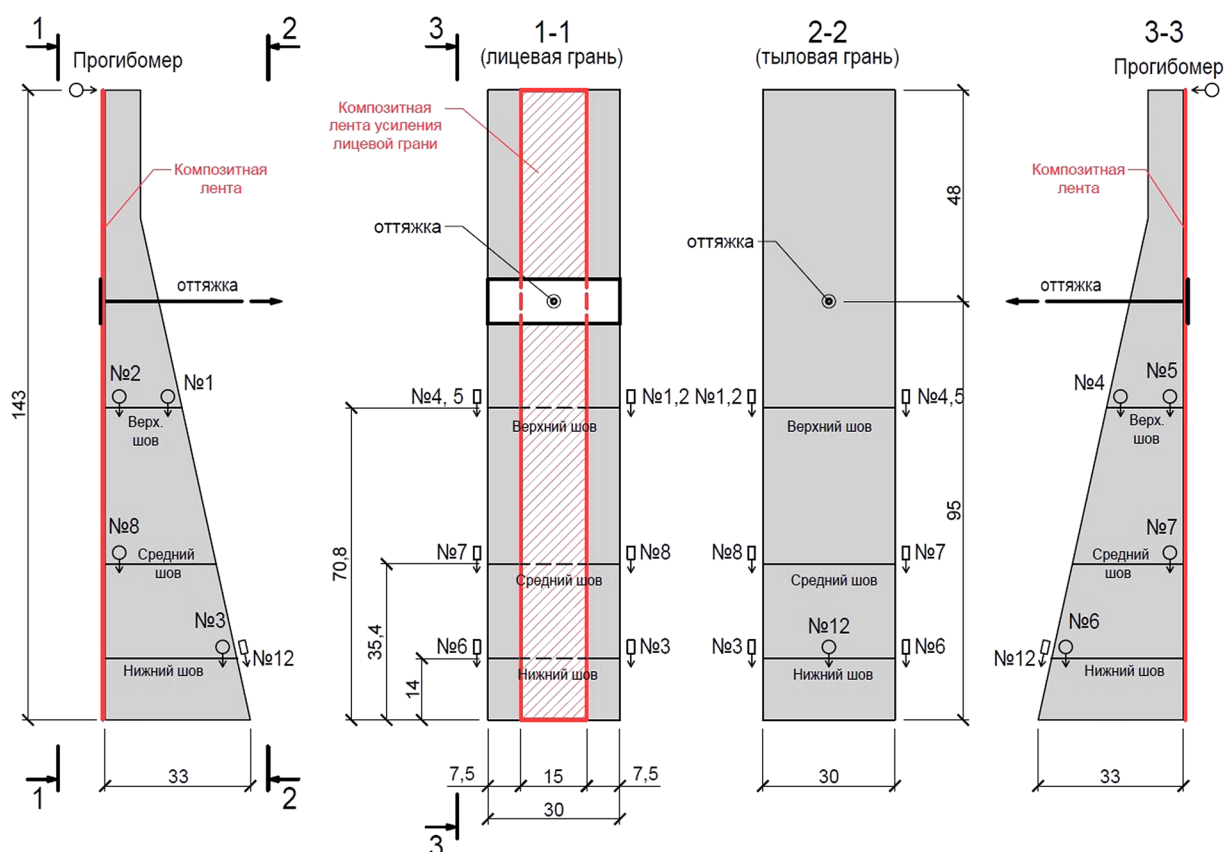


Рис. 4. Схема установки КИА на этапе 2 испытаний (размеры даны в см)



а



б

Рис. 5. Испытание модели подпорной стенки: а – на этапе 1; б – на этапе 2

Разрушение железобетонной модели, усиленной анкерной тягой и углеродной лентой, на этапе 2 происходило при нагрузке 58,24 кН. В целях сопоставления с результатами этапа 1 на рисунках 6 и 7 приводятся

значения соответствующих величин при нагрузке 45,76 кН. Перемещение верха модели составило 1,88 мм. Раскрытие нижнего горизонтального шва со стороны тыловой грани составило 0,17 мм; среднего горизонтального

шва со стороны лицевой грани – 0,16 мм; верхнего горизонтального шва со стороны лицевой грани – 0,15 мм (рис. 6). Раскрытие наклонной трещины вдоль тыловой арматуры из среднего шва составило 0,25 мм

(1-я трещина); наклонной трещины по лицевой арматуре из среднего шва – 0,40 мм (2-я трещина); наклонной трещины из нижнего шва – 0,50 мм (3-я трещина) (рис. 7). Усилие в анкерной тяге составило 35,48 кН.

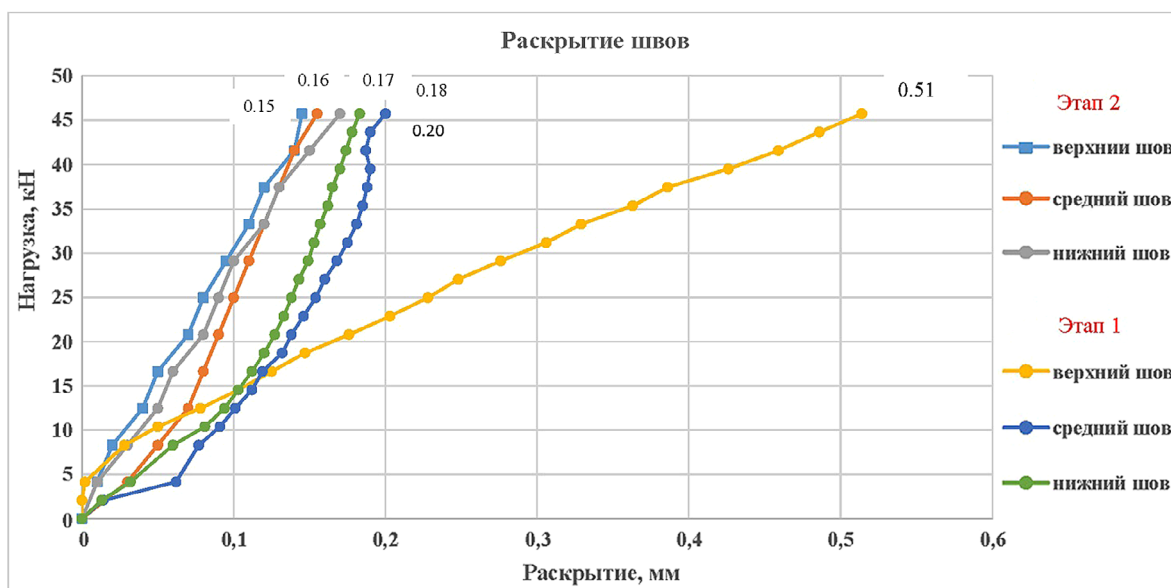


Рис. 6. Графики зависимости ширины раскрытия швов от нагрузки

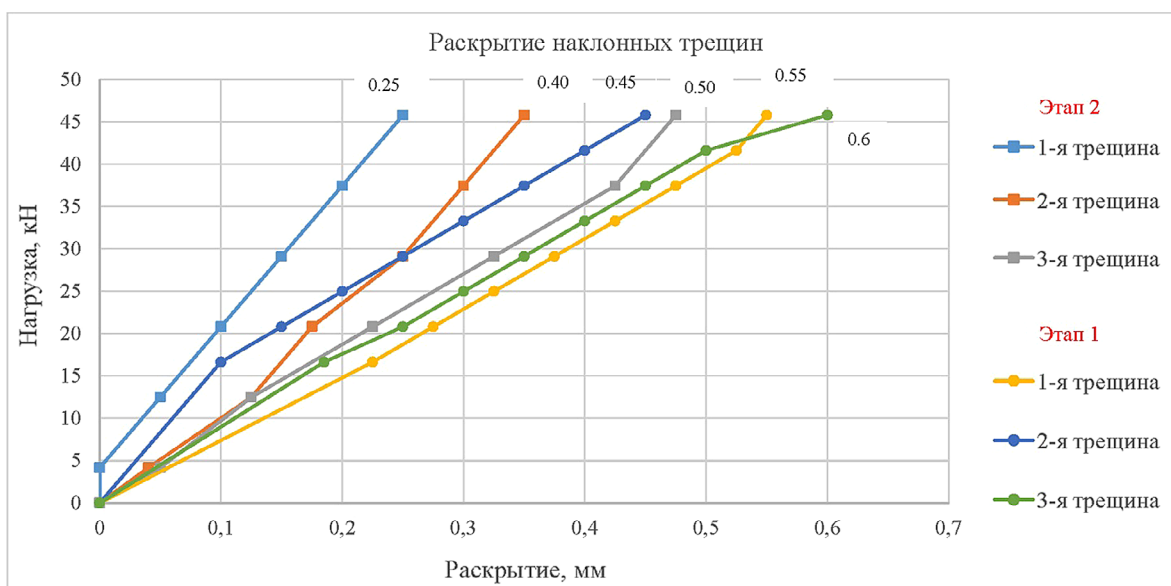


Рис. 7. Графики зависимости ширины раскрытия наклонных трещин от нагрузки

Сопоставление результатов экспериментальных исследований на этапе 1 и на этапе 2 показало, что разрушающая нагрузка увеличилась в 1,27 раза. При одинаковой нагрузке 45,76 кН средняя величина раскрытия горизонтальных межблочных швов снизилась в 2 раза (0,3 мм – на этапе 1; 0,15 мм – на этапе 2); средняя величина раскрытия наиболее характерных наклонных трещин снизилась в 1,39 раза (0,53 мм – на этапе 1; 0,38 мм – на этапе 2).

Таким образом, была экспериментально обоснована эффективность усиления железобетонных конструкций подпорных стенок композитными материалами.

Выводы

1. На железобетонной модели, специально созданной для низовой подпорной стенки водоприемника Загорской ГАЭС, выполненной в масштабе 1:12 и усиленной на первом и втором этапах испытаний

горизонтальной анкерной тягой диаметром 12 мм из стали Ст. 3., а на втором этапе углеродной лентой на лицевой грани, экспериментально обоснована эффективность усиления железобетонных конструкций подпорных стенок композитными материалами, а также целесообразность применения внешнего армирования углеродными лентами в гидротехническом строительстве.

2. Проведенные экспериментальные исследования показали, что за счет усиления углеродной лентой прочность железобетонной модели подпорной стенки водоприемника Загорской ГАЭС повысилась в 1,27 раза. При одинаковой нагрузке 45,76 кН средняя величина раскрытия горизонтальных межблочных швов снизилась в 2 раза, средняя величина раскрытия наиболее характерных наклонных трещин снизилась в 1,39 раза.

Библиографический список

1. **Волосухин В.А., Дыба В.П., Евтушенко С.И.** Расчет и проектирование подпорных стен гидротехнических сооружений. – М.: Изд-во АСВ, 2015. – 96 с.

2. Инструментальные и расчётные исследования низовых подпорных стен Загорской ГАЭС / Рубин О.Д., Баклыков И.В., Антонов А.С. и др. // Природообустройство. – 2019. – № 2. – С. 80-88.

3. Расчетные исследования напряженно-деформированного состояния подпорной стенки первого яруса ЛВ-1 водоприемника Загорской ГАЭС, в том числе с учетом данных синхронных замеров при суточном изменении уровня верхнего аккумулирующего бассейна / Рубин О.Д., Лисичкин С.Е., Нефедов А.В. и др. / Сб. Безопасность гидротехнических сооружений. – М.: ОАО «НИИЭС». – 2013. – вып. 18. – С. 38-50.

4. Расчетные исследования устойчивости и прочности подпорных стен первого яруса водоприемника Загорской ГАЭС / Лисичкин С.Е., Рубин О.Д., Атабиев И.Ж. и др. // Природообустройство. – 2012. – № 2. – С. 44-48.

5. **Рубин О.Д., Пономарев Д.И., Мельникова Н.И.** Расчетные исследования напряженно-деформированного состояния подпорных стен первого яруса водоприемника Загорской ГАЭС // Природообустройство. – 2011. – № 5. – С. 51-55.

6. **Лисичкин С.Е., Ляпин О.Б.** Поперечное армирование массивных конструкций энергетических сооружений // Энергетическое строительство. – 1989. – № 11. – С. 40-43.

7. **Рубин О.Д., Лисичкин С.Е., Пашенко Ф.А.** Разработка методики расчета напряженного состояния в горизонтальных сечениях гидротехнических подпорных стен уголкового типа // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. – 2019. – Т. 15. – № 5. – С. 339-344.

8. **Щербина В.И., Рубин О.Д., Ни В.Е.** Эксплуатация, оценка состояния и разработка мероприятий по повышению надежности шлюзов канала им. Москвы // Сб. науч. трудов. Сер. Гидроэлектростанции. М.: Информэнерго. – 1989. – Вып. 7. – 56 с.

9. **Сердюк А.И., Чернявский В.Л.** Опыт усиления строительных конструкций композиционными материалами при реконструкции Баксанской ГЭС // Гидротехника. – 2013. – 3 (32). – С. 115-117.

10. Новая технология ремонта ГТС посредством армирования композитными материалами / Рубин О.Д., Лисичкин С.Е., Балагуров В.Б., и др. // Изв. ВНИИГ. – 2016. – т. 280. – С. 3-10.

11. **Рубин О.Д., Лисичкин С.Е., Фролов К.Е.** Экспериментальные исследования железобетонных конструкций гидротехнических сооружений с блочными швами, усиленных системой внешнего армирования // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. – 2018. – № 3. – С. 198-204.

12. **Фролов К.Е.** Экспериментальные исследования железобетонных конструкций гидротехнических сооружений с системой внешнего армирования углеродными композитными ламелями // Природообустройство. – 2017. – № 1. – С. 56-61.

13. **Фролов К.Е.** Результаты экспериментальных исследований изгибаемых железобетонных конструкций гидросооружений, усиленных углеродными лентами, по второй группе предельных состояний // Природообустройство. – 2017. – № 2. – С. 42-47.

14. **Рубин О.Д., Лисичкин С.Е., Фролов К.Е.** Методика расчета прочности железобетонных конструкций гидротехнических сооружений, усиленных композиционными материалами // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. – 2017. – № 1. – С. 42-48.

Материал поступил в редакцию 30.11.2019 г.

Сведения об авторах

Рубин Олег Дмитриевич, доктор технических наук, директор филиала АО «Институт Гидропроект»-«НИИЭС», 125080,

г. Москва, Волоколамское ш. 2, пом. I, ком. 12; e-mail: info@niies.ru

Лисичкин Сергей Евгеньевич, доктор технических наук, главный научный сотрудник филиала АО «Институт Гидропроект»-«НИИЭС»; 125080, г. Москва, Волоколамское ш., 2, пом. I, ком. 12; e-mail: cskte@mail.ru.

Фролов Кирилл Евгеньевич, Руководитель проекта АО «Русатом Автоматизированные системы управления»;

109507, Москва, ул. Ферганская, 25; e-mail: kefrolov@gmail.com

Пащенко Федор Александрович, генеральный директор АО «ПИИНИИ ВТ «Ленаэропроект»; 198095, г. Санкт-Петербург, Набережная Обводного канала, д. 122; e-mail: lenair@lenair.ru

Зюзина Оксана Валерьевна, инженер 1 категории АО «ВНИИГ им. Б.Е. Веденева»; 195220, г. Санкт-Петербург, Гжатская, 2; e-mail: ZyuzinaOV@vniig.ru

O.D. RUBIN¹, S.E. LISICHKIN¹, K.E. FROLOV², F.A. PASHCHENKO³, O.V. ZYUZINA³

¹ Branch of JSC "Institute Hydroproject" – "NIIES", Moscow, Russia

² PJSC RusHydro, Moscow, Russia

³ JSC «Lenaeroproekt», Saint-Petersburg, Russia

⁴ JSC "Vedeneev VNIIG", Saint-Petersburg, Russia

THE EXPERIMENTAL RESEARCH OF THE REINFORCED CONCRETE RETAINING WALLS

Retaining walls are one of the most common hydraulic structures. Most reinforced concrete retaining walls have been in operation for a long time. For various reasons (including due to the incomplete consideration of all the features of such structures during their design, construction and operation), in some cases their strengthening was required. One of the ways to strengthen retaining walls is the device of anchor rods that hold the top of the walls from displacement in the direction from the soil backfill. In recent years, a method has been found to strengthen reinforced concrete structures for various purposes by additional external reinforcement using carbon fiber composite materials. Taking into account the characteristic features of massive hydraulic engineering reinforced concrete, a reinforced concrete model of a corner-type retaining wall was made, reinforced with anchor rod and carbon tape. In this case, the reinforcing element, a carbon tape, was glued vertically on the front face of the model. To monitor the state of the reinforced concrete model during the experiments, control and measuring equipment was installed. Experimental studies were carried out on a specially equipped power stand. As a result of the tests, the displacement of the top of the model, the opening width of the horizontal interblock seams and inclined cracks that emerged from the seams, the force in the anchor rod, and the fracture load of the model were determined. When analyzing the results obtained, an increase in the strength of the reinforced concrete model reinforced with a carbon composite tape was determined. Thus, a 1.27-fold increase in the strength of the reinforced concrete model of the retaining wall due to the use of a carbon composite tape was obtained.

Hydraulic structures; reinforced concrete retaining walls; reinforcement of structures; anchor rods; external reinforcement; carbon composite tapes; experimental research; reinforced concrete models.

References

1. **Volosukhin V.A., Dyba V.P., Evtushenko S.I.** Calculation and design of retaining walls of hydraulic structures. – Publishing house DIA, 2015. – 96 p.

2. Instrumental and design studies of the lower retaining walls of the Zagorskaya PSPP / Rubin O.D., Baklykov I.V., Antonov A.S. i dr. // Environmental Engineering. – 2019. – № 2. – FROM. 80-88.

3. Design studies of the stress-strain state of the retaining wall of the first tier of LV-1 of the intake of the Zagorskaya PSPP, including

taking into account the data of synchronous measurements with a daily change in the level of the upper accumulating basin / Rubin O.D., Lisichkin S.E., Nefedov A. IN. et al. // Safety of hydraulic structures. – M.: NIIES OJSC. – 2013. – issue. 18. – S. 38-50.

4. Computational studies of the stability and strength of retaining walls of the first tier of the water intake of the Zagorskaya PSPP / Lisichkin S.E., Rubin O.D., Atabiev I.Zh. i dr. // Environmental Engineering. – 2012. – No. 2. – S. 44-48.

5. **Rubin O.D., Ponomarev D.I., Melnikova N.I.** Computational studies of the stress-strain

state of retaining walls of the first tier of the intake of the Zagorskaya PSPP // Environmental Engineering. – 2011. – 5. – S. 51-55.

6. **Lisichkin S.E., Lyapin O.B.** Transverse reinforcement of massive structures of power structures // Energy construction. – 1989. – No. 11. – S. 40-43.

7. **Rubin O.D., Lisichkin S.E., Pashchenko F.A.** Development of methods for calculating the stress state in horizontal sections of hydraulic engineering retaining walls of a corner type // Structural Mechanics of Engineering Structures and Structures. – 019. – T. 15. – 5. – FROM. 339-344.

8. **Shcherbina V.I., Rubin O.D., Ni V.E.** Operation, assessment and development of the measures to improve the reliability of the Moscow Canal locks // Collection of scientific papers. Hydroelectric power stations. M.: Informenergo. – 1989. – Issue. 7. – 56 p.

9. **Serdyuk A.I., Chernyavsky V.L.** The experience of strengthening building structures with composite materials during the reconstruction of the Baksan hydroelectric station // Hydrotechnics. – 2013. – 3 (32). – FROM. 115-117.

10. New technology for repairing hydraulic structures by means of reinforcing with composite materials / Rubin O.D., Lisichkin S.E., Balagurov V.B., et al. // Izv. VNIIG. – 2016. – t. 280. – S. 3-10.

11. **Rubin O.D., Lisichkin S.E., Frolov K.E.** Experimental studies of reinforced concrete structures of hydraulic structures with block joints reinforced by an external reinforcement system // Structural Mechanics of Engineering Structures and Structures. – 2018. – № 3. – S. 198-204.

12. **Frolov K.E.** Experimental studies of reinforced concrete structures of hydraulic

structures with an external reinforcement system with carbon composite lamellas // Environmental Engineering. – 2017. – № 1. – FROM. 56-61.

13. **Frolov K.E.** The results of experimental studies of flexible reinforced concrete structures of hydraulic structures reinforced with carbon tapes for the second group of limiting states // Environmental Engineering. – 2017. – № 2. – FROM. 42-47.

14. **Rubin O.D., Lisichkin S.E., Frolov K.E.** Method for calculating the strength of reinforced concrete structures of hydraulic structures reinforced with composite materials // Structural Mechanics of Engineering Structures and Structures. – 2017. – № 1. – S. 42-48.

The material was received at the editorial office
30.11.2019

Information about the authors

Rubin Oleg Dmitrievich, doctor of Technical Sciences, Director of the branch of JSC “Institute Hydroproject” – “NIIES”; e-mail: info@niies.ru

Lisichkin Sergey Evgenievich, doctor of Technical Sciences, Chief Researcher of the branch of JSC “Institute Hydroproject” – “NIIES”; e-mail: cskte@mail.ru

Frolov Kirill Evgenievich, Project Manager of JSC «Rusatom Automated Control Systems»; 109507, Moscow, st. Ferghanskaya, 25; e-mail: kefrolov@gmail.com

Pashchenko Fedor Aleksandrovich, general Director of JSC «Lenaeroproect»; e-mail: lenair@lenair.ru

Zyuzina Oksana Valerievna, engineer 1 categories of JSC “Vedeneev VNIIG”; e-mail: ZyuzinaOV@vniig.ru

УДК 502/504:627.43:550.834

DOI 10.34677/1997-6011/2020-1-79-88

Д.А. КРУТОВ

Казахстанско-Немецкий университет, г. Алматы, Республика Казахстан

СЕЙСМОУСИЛЕНИЕ ГРУНТОВОЙ ПЛОТИНЫ: ПРОЕКТ И РАСЧЕТНОЕ ОБОСНОВАНИЕ

В связи с повышением сейсмичности в районе расположения гидроузла проведен анализ сейсмостойчивости грунтовой плотины и по результатам этого анализа выполнен проект усиления. Целью расчетных исследований является нахождение такого высотного положения пригрузки и таких заложений ее низового откоса, при которых будет обеспечиваться нормативное значение коэффициента запаса устойчивости. В статье рассмотрены проектные решения и технологические мероприятия по ремонту плотины в условиях продолжающейся эксплуатации.