

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ EXPERIMENTAL RESEARCHES

DOI 10.22363/1815-5235-2020-16-6-504-512
УДК 626.01

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH ARTICLE

Экспериментальные исследования железобетонных конструкций гидротехнических сооружений, усиленных предварительно напряженной поперечной арматурой

О.В. Зюзина

Всероссийский научно-исследовательский институт гидротехники имени Б.Е. Веденеева, Российская Федерация, 195220,
Санкт-Петербург, ул. Гжатская, д. 21
ZyuzinaOV@vniig.ru

История статьи

Поступила в редакцию: 2 сентября 2020 г.
Доработана: 20 ноября 2020 г.
Принята к публикации: 24 ноября 2020 г.

Аннотация

Актуальность. При ремонте гидротехнических сооружений (ГТС) часто приходится сталкиваться с задачей их усиления. Среди методов усиления подпорных сооружений наибольший интерес представляют те, что позволяют сразу включать элементы усиления в совместную работу с сооружением и не удалять грунт засыпки со стороны тыловой грани. При выборе ремонтных материалов следует обратить внимание на коррозионностойкие композитные материалы, использование которых в гидротехническом строительстве еще не нормируется, однако область их применения с каждым годом все больше расширяется. Основной целью экспериментальных исследований является усиление железобетонных конструкций гидротехнических сооружений, в том числе имеющих межблочные строительные швы и наклонные трещины, с помощью предварительно напряженной поперечной арматуры. **Методы.** Исследования проведены на железобетонной модели балочного типа, усиленной предварительно напряженной поперечной арматурой в зоне образования наклонных трещин. Модель изготовлена с учетом характерных задач, встречающихся при ремонте длительно эксплуатируемых подпорных гидротехнических сооружений, имеющих раскрывшиеся швы и трещины, недостаточное поперечное армирование, низкий коэффициент армирования, начальный прогиб. **Результаты.** Реализована задача усиления специальной железобетонной модели с помощью предварительно напряженной поперечной арматуры. Получены экспериментальные данные о характере деформирования и разрушения, раскрытии межблочных строительных швов и трещин, напряжениях в арматуре. Даны рекомендации по усилению предварительно напряженной арматурой эксплуатируемых малоармированных железобетонных конструкций ГТС с межблочными строительными швами.

Ключевые слова: гидротехнические сооружения, межблочные швы и трещины, поперечная арматура, предварительное напряжение, усиление конструкций, экспериментальные исследования

Для цитирования

Зюзина О.В. Экспериментальные исследования железобетонных конструкций гидротехнических сооружений, усиленных предварительно напряженной поперечной арматурой // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2020. Т. 16. № 6. С. 504–512. <http://dx.doi.org/10.22363/1815-5235-2020-16-6-504-512>

Зюзина Оксана Валерьевна, инженер 1-й категории, аспирант Всероссийского научно-исследовательского института гидротехники имени Б.Е. Веденеева; eLIBRARY SPIN-код: 6769-5035, Scopus Author ID: 2-s2.0-85086440563.

© Зюзина О.В., 2020



This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License
<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

Experimental studies of reinforced concrete structures of hydraulic structures strengthened with prestressed transverse reinforcement

Oksana V. Zyuzina

B.E. Vedenev All-Russia Research Institute of Hydraulic Engineering, 21 Gzhatskaya St, Saint Petersburg, 195220, Russian Federation
ZyuzinaOV@vniig.ru

Article history

Received: September 2, 2020

Revised: November 20, 2020

Accepted: November 24, 2020

Abstract

Relevance. When repairing hydraulic structures, it is often necessary to face the task of strengthening them. Among the methods of strengthening retaining structures, the most interesting are those that allow to immediately include reinforcement elements in joint work with the structure and carry out work without removing the backfill soil from the rear edge. When choosing repair materials, attention should be paid to corrosion-resistant composite materials, the use of which in hydraulic engineering is not yet standardized, but the scope of their application is expanding every year. The main *aim* of experimental research is to strengthen the reinforced concrete structures of hydraulic structures, including those with interblock construction joints and transverse cracks, using prestressed transverse reinforcement. **Methods.** The investigations were carried out on a reinforced concrete model of a beam type reinforced with prestressed transverse reinforcement in the zone of inclined cracks formation. The model was made taking into account the typical tasks encountered during the repair of long-term operating retaining hydraulic structures with open seams and cracks, insufficient transverse reinforcement, low reinforcement coefficient, and initial deflection. **Results.** The task of strengthening a special reinforced concrete model using prestressed transverse reinforcement was realized. Experimental data were obtained on the nature of deformation and destruction, the opening of interblock construction joints and cracks, and the stresses in the reinforcement. Recommendations are given for strengthening the operated low-reinforced concrete structures of hydraulic structures with interblock construction joints with prestressed reinforcement.

Keywords: hydraulic structures, interblock joints and cracks, cross-section reinforcement, pre-tension, structural reinforcement, experimental studies

For citation

Zyuzina O.V. Experimental studies of reinforced concrete structures of hydraulic structures strengthened with prestressed transverse reinforcement. *Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings*. 2020; 16(6):504–512. (In Russ.) <http://dx.doi.org/10.22363/1815-5235-2020-16-6-504-512>

1. Введение

Железобетонные конструкции гидротехнических сооружений (ГТС) в течение длительного периода их работы подвержены воздействию комплекса нагрузок при наличии особого характера трещинообразования в зоне действия изгибающих моментов и поперечных сил [1; 2]. В связи с длительным периодом эксплуатации все чаще возникает потребность в их ремонте и усилении [3–8].

Применяются различные методы усиления длительно эксплуатируемых железобетонных конструкций ГТС (подпорных стен, устоев, стен шлюзов и др.) и в первую очередь со стороны лицевой грани, поскольку со стороны тыловой грани присутствует грунтовая засыпка практически на всю высоту этих сооружений. При этом представляется целесообразным обратить внимание на набирающую обороты тенденцию применения композитных материалов, обладающих среди прочих такими особенностями, как коррозионная стойкость при эксплуатации в агрессивной среде и гораздо меньший вес в сравнении со сталью. В гидротехническом строительстве использование композитных материалов еще не нормируется, однако в этом направлении активно ведутся работы [9–24].

При анализе «непроектного состояния» стен шлюзов отмечается необходимость в ряде случаев установки дополнительной поперечной арматуры при наличии наклонных трещин в конструкции, выходящих на лицевую грань [2].

В практике промышленного и гражданского строительства известен способ усиления изгибаемых конструкций на восприятие поперечных сил с помощью преднапряженных поперечных стержней [18]. Стержни устанавливаются по внешним граням усиливаемой конструкции на участках действия избыточной поперечной силы и стягиваются, усиливая балочный элемент в необходимой степени. Исследования

в данном направлении проводились в Ленинградском инженерно-строительном институте в 1963 г. [18] на опытных балках двутаврового сечения высотой 30 см при пролете 3 м и высоким коэффициентом продольного армирования $\mu = 0,024$, характерным для указанной области строительства.

Также следует отметить исследования балок с $\mu = 0,02$, проведенные в Полоцком государственном университете, в результате которых «экспериментально подтверждена эффективность усиления в зоне среза изгибаемых железобетонных элементов установкой дополнительной предварительно напряженной поперечной арматуры, в том числе под нагрузкой» [19].

Однако в практике ремонта и усиления малоармированных конструкций ГТС, для которых характерно наличие межблочных строительных швов как в продольном, так и в поперечном направлениях, использование предварительно напряженной поперечной арматуры пока не нашло применения ввиду отсутствия необходимого экспериментально-расчетного обоснования.

Для разработки технических решений по усилению длительно эксплуатируемых железобетонных конструкций ГТС представляется необходимым проведение экспериментальных исследований с целью обоснования эффективного применения предварительно напряженной поперечной арматуры, устанавливаемой в тело бетона конструкции со стороны лицевой грани ГТС (подпорного сооружения) и пересекающей наклонные трещины, образовавшиеся из межблочных строительных швов.

Для реализации вышеуказанной цели проведены экспериментальные исследования, учитывающие характерные особенности железобетонных конструкций ГТС: невысокий класс бетона и арматуры; коэффициент продольного армирования $\mu < 0,01$; наличие межблочных строительных швов; нарушение сцепления рабочей стальной арматуры с бетоном в зоне размещения межблочных строительных швов как результат проявления усадочных деформаций бетона при твердении (в период строительства), а также длительной эксплуатации железобетонных конструкций ГТС при температурных и знакопеременных нагрузках; наличие наклонных трещин, образовавшихся из межблочных строительных швов.

2. Методы

Исследования проведены на основе модели балочного типа с двумя вертикальными межблочными строительными швами. Выбор типа модели, схемы ее опирания и нагружения, мест расположения швов, схемы армирования, типа арматуры обусловлен часто встречающимися в практике гидротехнического строительства расчетными случаями и позволяет изучить в лабораторных условиях работу изгибаемой конструкции со швами и трещинами как в зоне совместного действия изгибающего момента и поперечной силы (зона среза), так и в зоне чистого изгиба.

Поперечное сечение балки: прямоугольное $b \times h = 150 \times 300$ мм, длина – 2000 мм; класс бетона В30=В35. Для устройства межблочных строительных швов, расположенных на расстоянии 465 мм от торцов балки, бетонирование проводилось в два приема.

Опытная модель изготовлена со стальной рабочей продольной арматурой $2\text{Ø}12$ класса А400 (коэффициент армирования $\mu = 0,0056$), что является малоармированной конструкцией, присущей ГТС. Конструкция опытной балки представлена на рис. 1.

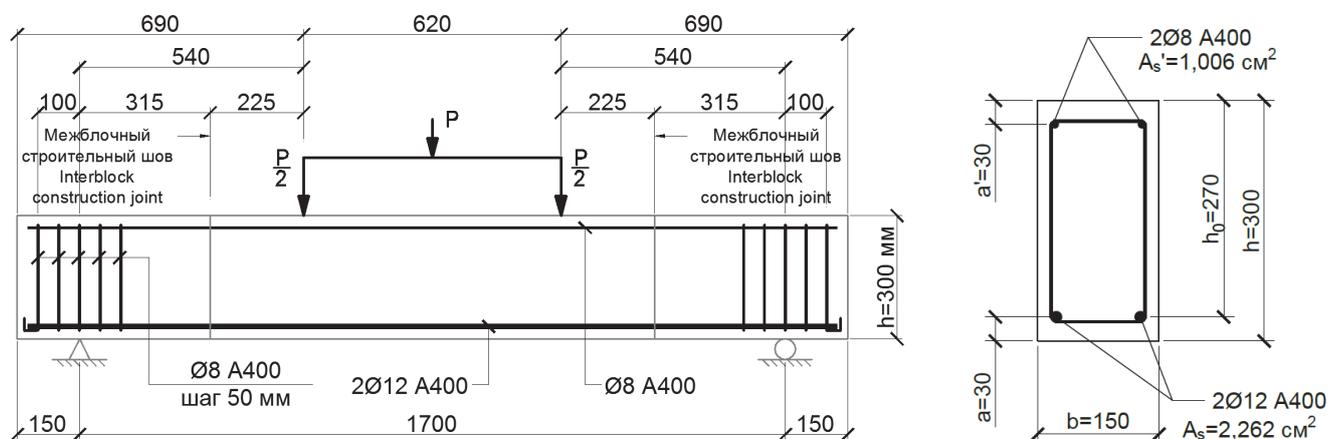


Рис. 1. Конструкция и схема нагружения балки, мм
[Figure 1. Design and loading diagram of a beam, mm]

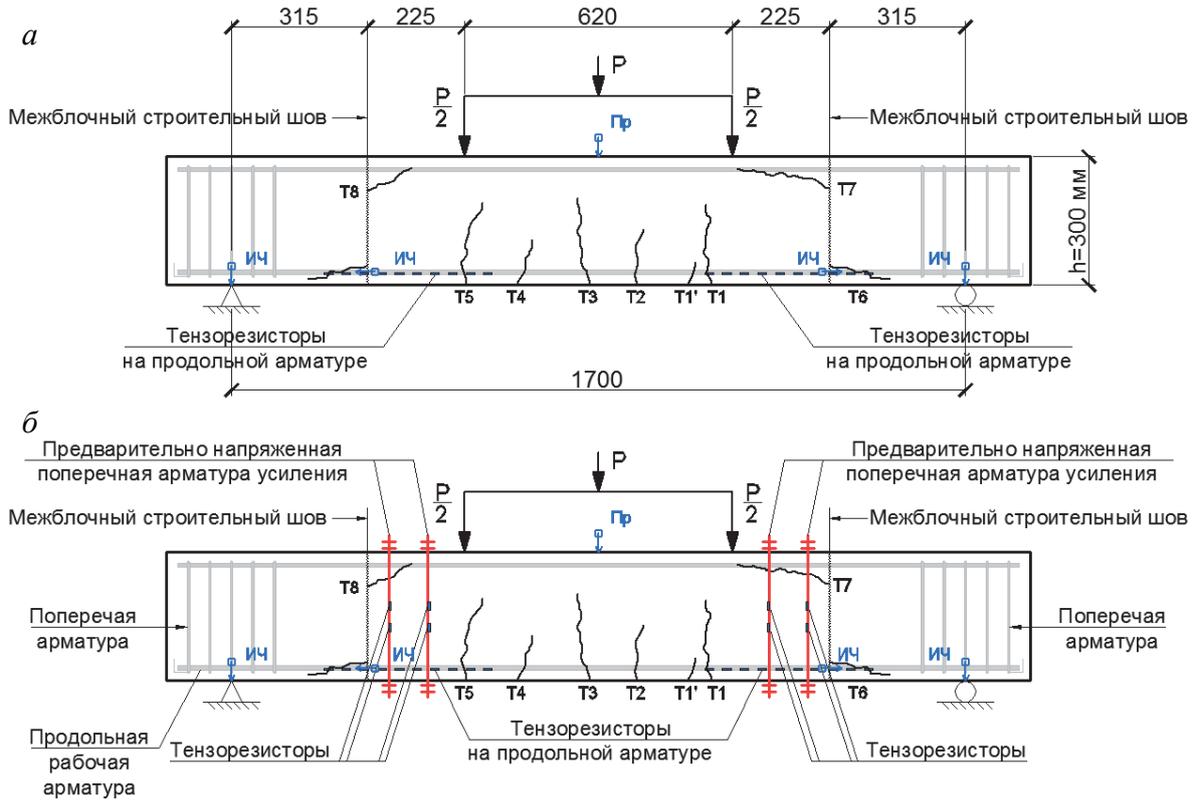


Рис. 2. Схема установки КИА, характер трещинообразования в балке и схема усиления:

a – схема установки КИА на бетоне и стальной арматуре и характер трещинообразования; *б* – схема усиления и характер трещинообразования

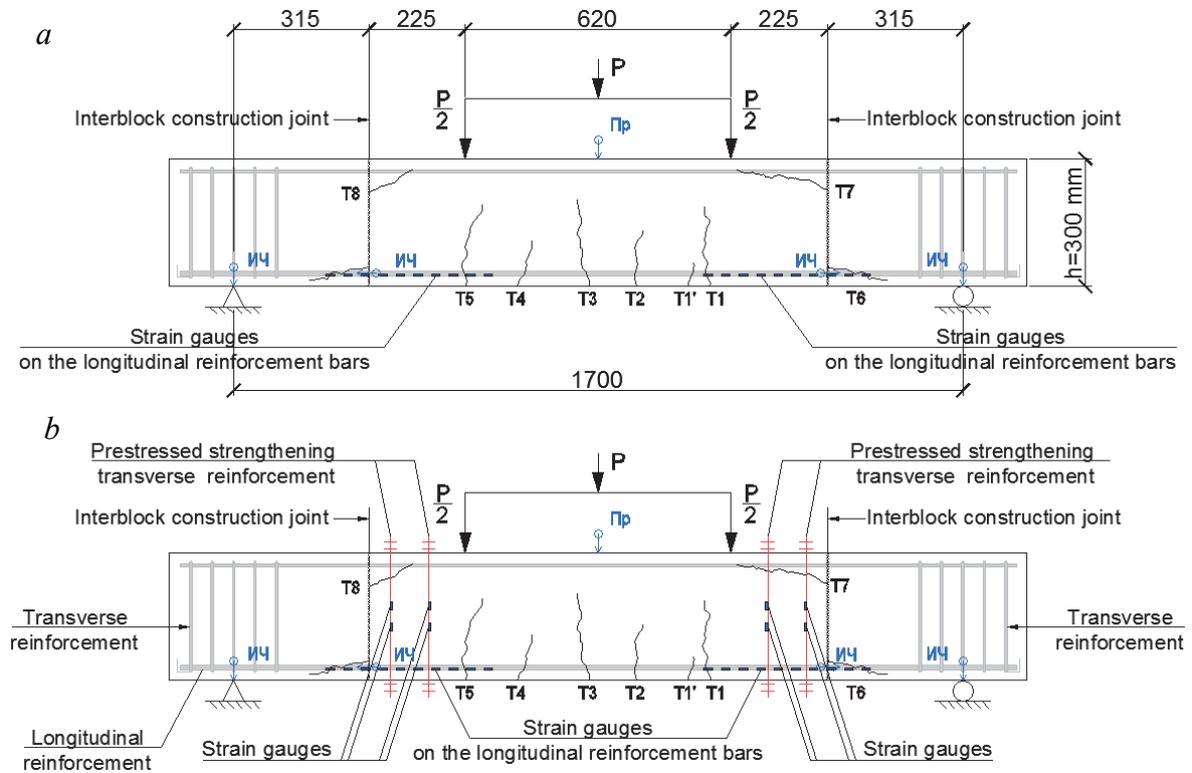


Figure 2. Diagram of the installation of instrumentation, the nature of cracking in the beam and the reinforcement diagram:

a – diagram of the installation of instrumentation on concrete and steel reinforcement and the nature of cracking; *b* – the scheme of strengthening and the nature of cracking

Опирали опытной балки производилось на шарнирно-неподвижную и шарнирно-подвижную (катковую) опоры.

Нагрузка P от гидравлического домкрата прикладывалась вертикально ступенями и передавалась через горизонтальную траверсу в двух точках на расстоянии 310 мм от центра балки, при этом расстояние между силами (зона чистого изгиба) составило 620 мм, а расстояние между силами и опорами (пролет среза) – 540 мм (рис. 1).

Опытная балка оснащалась контрольно-измерительной аппаратурой (КИА), как это показано на рис. 2:

- индикаторами часового типа для измерения ширины раскрытия межблочных швов и трещин;
- прогибомерами для измерения прогибов в пролете балки и индикаторами часового типа – для перемещения опор;
- тензорезисторами с базой 20 мм для измерения деформаций арматуры (продольной рабочей и предварительно напряженной поперечной).

Испытания опытной модели проводились в два этапа. После каждого этапа производилось разгрузка модели и подготовка к следующему этапу.

3. Результаты и обсуждение

3.1. Первый этап – испытание неусиленной конструкции

На первом этапе исследований опытная балка испытывалась без усиления и доводилась до разрушения по бетону, которое наступало от действия изгибающих моментов и поперечных сил по характерным наклонным трещинам, образовавшимся из межблочных строительных швов по направлению к местам приложения нагрузки $P/2$. Разрушение балки произошло хрупко при нагрузке $P = 57,2$ кН.

Рассмотрим основные результаты первоначальных экспериментальных исследований.

В опытной балке зафиксирован следующий характер трещинообразования (рис. 2, а): после раскрытия вертикальных межблочных швов на расстоянии $X_{ш} = 0,24 \cdot h_{ш}$ от сжатой грани в балке произошло выклинивание наклонных трещин по направлению к приложенным силам, при этом при нагрузке, близкой к разрушающей, образовались трещины вдоль продольной стальной арматуры по направлению от межблочного шва к опорам. На участке между силами в зоне чистого изгиба образовалась система вертикальных нормальных трещин.

Опытное значение силы P , соответствующее образованию наклонных трещин из межблочных швов и разрушению балки по схеме «вертикальная трещина по шву – наклонная трещина из шва по направлению к силе – горизонтальная трещина вдоль рабочей стальной арматуры по направлению к опоре»:

- а) сила P , соответствующая образованию наклонных трещин из межблочных строительных швов – 46,8 кН (82 % от разрушающей нагрузки);
- б) сила P , соответствующая хрупкому разрушению балки – 57,2 кН.

3.2. Второй этап – испытание конструкции, усиленной предварительно напряженной поперечной арматурой

Второй этап экспериментальных исследований заключался в установке в пролете среза поперечной арматуры ($\varnothing 12$ мм) по длине наклонных трещин, образовавшихся из межблочных строительных швов.

Предварительное натяжение поперечной арматуры производилось на величину 27,2–49,2 МПа (для стальной поперечной арматуры деформации натяжения $\varepsilon_s^n = (13,6 \div 24,6) \cdot 10^{-5}$; для базальтокомпозитной арматуры деформации натяжения $\varepsilon_f^n = (54,4 \div 98,4) \cdot 10^{-5}$). По мере возрастания нагрузки (силы P) на балку (рис. 3) деформации в поперечной арматуре возросли на максимальную величину – до $\varepsilon_s^n = 69 \cdot 10^{-5}$ (138 МПа), при этом хрупкого разрушения балки при $P = 62,4$ кН не произошло, что выше на 9,1 % силы $P = 57,2$ кН, соответствующей хрупкому разрушению балки без предварительно напряженной поперечной арматуры.

Графики напряжений в продольной арматуре в сечении по межблочным строительным швам и под силой $P/2$ представлены на рис. 4. Из них следует, что σ_s под силой $P/2$ превышает σ_s^{III} по швам в 1,2 раза при $P = 62,4$ кН.

Необходимо отметить, что максимальные напряжения в рабочей арматуре в сечении приложения силы $P/2$ соизмеримы с опытной величиной предела текучести арматуры класса А400.

Графики ширины раскрытия межблочных строительных швов и нормальных трещин в зоне чистого изгиба представлены на рис. 5. Из них следует, что a_{cr}^{III} превышает величину a_{cr} , при этом a_{cr}^{III} не превышает допускаемую величину по СП 41.13330.2012 (п. 9.8), равную 0,5 мм [25].

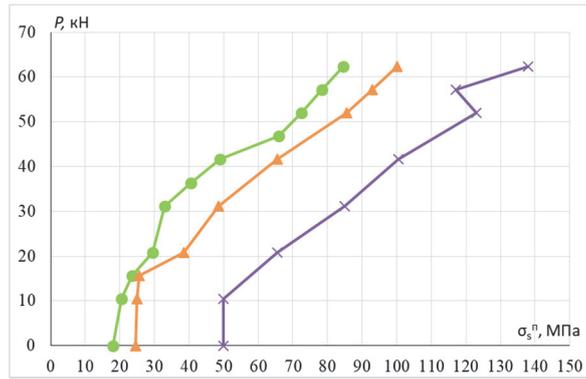


Рис. 3. Графики напряжений в поперечной предварительно напряженной арматуре усиления, расположенной по длине наклонной трещины:

—●—, —▲—, —×— – балка, усиленная предварительно напряженной поперечной арматурой (в результате трех испытаний)
 [Figure 3. Graphs of stresses in transverse prestressed reinforcement located along the length of an inclined crack:
 —●—, —▲—, —×— – beam reinforced with prestressed transverse reinforcement (as a result of three tests)]

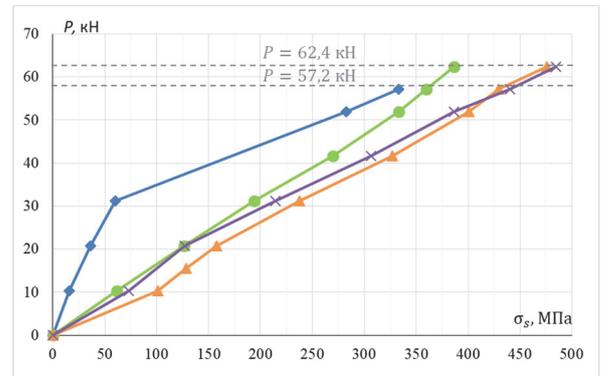
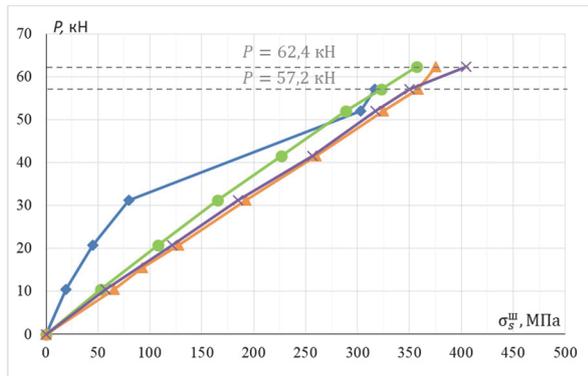


Рис. 4. Графики напряжений в продольной арматуре:

a – в сечении по межблочным строительным швам; *б* – в сечении приложения силы $P/2$; —●— – балка без предварительно напряженной арматуры;
 —●—, —▲—, —×— – балка, усиленная предварительно напряженной поперечной арматурой (в результате трех испытаний)
 [Figure 4. Graphs of stresses in longitudinal reinforcement:
a – in cross-section along interblock construction joints; *б* – in the section of the application of the force $P/2$; —●— – beam without prestressed reinforcement;
 —●—, —▲—, —×— – beam reinforced with prestressed transverse reinforcement (as a result of three tests)]

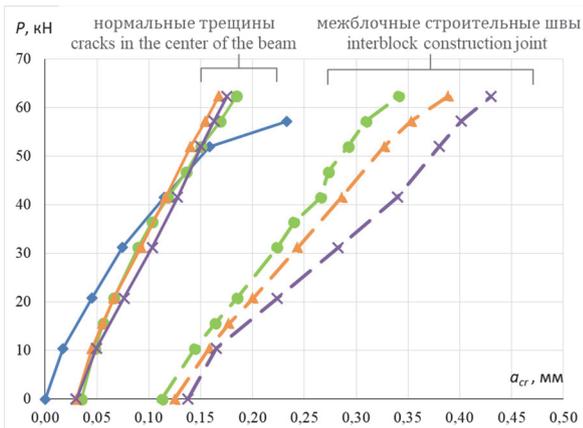


Рис. 5. Графики ширины раскрытия межблочных строительных швов и нормальных трещин в зоне чистого изгиба:

—●— – балка без предварительно напряженной арматуры;
 —●—, —▲—, —×— – балка, усиленная предварительно напряженной поперечной арматурой (в результате трех испытаний)
 [Figure 5. Graphs of the width of the opening of interblock construction joints and normal cracks in the clean bend zone:
 —●— – beam without prestressed reinforcement; —●—, —▲—, —×— – beam reinforced with prestressed transverse reinforcement (as a result of three tests)]

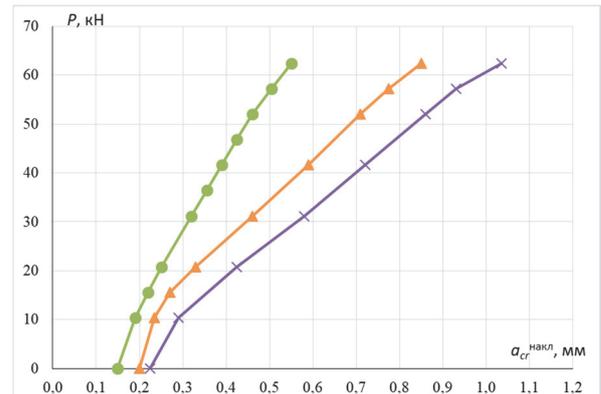


Рис. 6. Графики ширины раскрытия наклонной трещины:
 —●—, —▲—, —×— – балка, усиленная предварительно напряженной поперечной арматурой (в результате трех испытаний)
 [Figure 6. Graphs of inclined crack opening width (as a result of three tests):
 —●—, —▲—, —×— – beam reinforced with prestressed transverse reinforcement (as a result of three tests)]

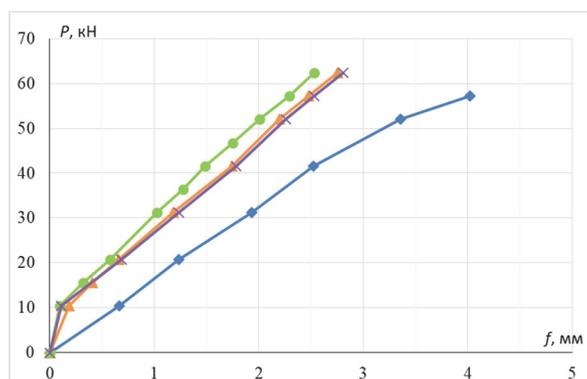


Рис. 7. Графики прогиба балки:

— балка без предварительно напряженной арматуры;

—, —, — балка, усиленная предварительно напряженной поперечной арматурой (в результате трех испытаний)

[Figure 7. Graphs of beam deflection:

— beam without prestressed reinforcement; —, —, — beam reinforced with prestressed transverse reinforcement (as a result of three tests)]

Графики ширины раскрытия наклонной трещины, образовавшейся из межблочных строительных швов, представлены на рис. 6.

Графики прогиба балки представлены на рис. 7. Из них следует уменьшение прогиба усиленной предварительно напряженной поперечной арматурой балки при $P = 57,2$ кН в 1,6 раза.

4. Заключение

Применение предварительно напряженной поперечной арматуры в зоне образования наклонных трещин из межблочных строительных швов представляется достаточно позитивным при усилении малоармированных железобетонных конструкций ГТС (подпорных стен, устоев, стен шлюзов и др.) и в первую очередь со стороны лицевой грани, поскольку со стороны тыловой грани присутствует грунтовая засыпка практически на всю высоту этих сооружений. В качестве предварительно напряженной поперечной арматуры наиболее эффективно использовать базальтокомпозитную арматуру, прежде всего с точки зрения технологии производства работ и сопротивляемости воздействию агрессивных сред, с дальнейшим ее омоноличиванием в теле бетона конструкции.

Анализ результатов экспериментальных исследований указывает:

а) на восстановление несущей способности малоармированной железобетонной конструкции с межблочными строительными швами;

б) совместную работу системы усиления предварительно напряженной поперечной арматурой со всей конструкцией в целом с момента начала нагружения балки;

в) определенное накопление величины ширины раскрытия наклонной трещины в процессе трех испытаний в зоне действия поперечных сил (действие поперечных сил превалирует над изгибающим моментом в результате увеличения жесткости балок в зоне наклонных трещин);

г) снижение прогиба балки, усиленной предварительно напряженной поперечной арматурой.

Необходим комплексный подход к усилению эксплуатируемых малоармированных железобетонных конструкций ГТС с межблочными строительными швами предварительно напряженной поперечной и продольной арматурой.

В части обеспечения прочностных и технологических параметров усиления ГТС наиболее предпочтительной является базальтокомпозитная арматура, применение которой в гидротехнических сооружениях в настоящее время не нормируется. Вместе с тем в Российской Федерации действует ряд отдельных нормативных документов, регламентирующих применение композитной арматуры [20–22].

Список литературы

1. Беллендир Е.Н., Рубин О.Д., Лисичкин С.Е., Зюзина О.В. Экспериментальные исследования потерь предварительно напряженного базальтокомпозитной арматуры в составе бетонного элемента // Гидротехническое строительство. 2020. № 7. С. 2–6.
2. Рубин О.Д., Лисичкин С.Е., Николаев В.Б., Башкиров Д.С. Особенности напряженно-деформированного состояния стен камер шлюзов // Вестник МГСУ. 2019. Т. 14. Вып. 4. С. 473–483. DOI: 10.22227/1997-0935.2019.4.473-483.

3. Regan P.J. An examination of dam failures vs. age of dams // *Hydro review*. Vol. 29. No. 4. 2010, June. Pp. 62–68.
4. Моргунов К.П., Рябов Г.Г. Анализ возможных причин образования трещины в левом устое нижней головы шлюза № 2 Белоусовского гидроузла // Проектирование, строительство и эксплуатация гидротехнических сооружений водных путей: сборник материалов конференции. СПб.: Изд-во ГУМРФ имени адм. С.О. Макарова, 2017. Т. 1. С. 115–131.
5. Давиденко В.М., Штильман В.Б., Фотиев П.И. Обоснование критериев безопасности и надежности бетонных и железобетонных строительных конструкций гидротехнических сооружений при использовании современных материалов и технологий их защиты и ремонта // *Гидротехника*. 2011. № 2 (23). С. 40–45.
6. Рубин О.Д., Умнова Р.В., Ни В.Е. Усиление эксплуатируемых подпорных сооружений // *Гидротехническое строительство*. 1989. № 12. С. 42–45.
7. Mason P.J. Dam engineering: the last 50 years, and the 50 years ahead // *Hydropower & Dams*. 2016. Vol. 23. Issue 6. Pp. 83–89.
8. Kreuzer H. Dam safety and monitoring. Practical discussions tackle global issues in Montreux. *Hydro 2016 report* // *Hydropower & Dams*. 2016. Vol. 23. Issue 6. Pp. 119–120.
9. Рубин О.Д., Лисичкин С.Е., Фролов К.Е., Пащенко Ф.А., Зюзина О.В. Экспериментальные исследования железобетонных подпорных стен // *Природообустройство*. 2020. № 1. С. 72–79. DOI: 10.26897/1997-6011/2020-1-72-79.
10. Рубин О.Д., Лисичкин С.Е., Балагуров В.Б., Александров А.В. Новая технология ремонта ГТС посредством армирования композитными материалами // *Известия ВНИИГ имени Б.Е. Веденеева*. 2016. № 280. С. 3–9.
11. Hamed E., Bradford M.A. Flexural time-dependent cracking and post-cracking behaviour of FRP strengthened concrete beams // *International Journal of Solids and Structures*. 2012. Vol. 49. Pp. 1595–1607.
12. Zhou Y., Gou M., Zhang F., Zhang Sh., Wang D. Reinforced concrete beams strengthened with carbon fiber reinforced polymer by friction hybrid bond technique: experimental investigation // *Materials and Design*. 2013. Vol. 50. Pp. 130–139.
13. Selvachandran P., Anandakumar S., Muthuramu K.L. Deflection Behavior of Prestressed Concrete Beam using Fiber Reinforced Polymer (FRP) Tendon // *The Open Civil Engineering Journal*. 2016. No. 10. Pp. 40–60.
14. Zhu H., Yang Y. External Prestressing Bridge Reinforcement Technology Review // *MATEC Web of Conferences*. 2015. Vol. 22. Article 04028.
15. Pavlović A., Donchev T., Petkova D., Limbachiya M., Almuhaissen R. Pretensioned BFRP reinforced concrete beams: flexural behaviour and estimation of initial prestress losses // *MATEC Web of Conferences*. 2019. Vol. 289. Article 09001.
16. Завгороднев А.В., Уманский А.М., Беккер А.Т., Борисов Е.К. Перспективы применения композитной арматуры в морском гидротехническом строительстве // *Архитектура и строительство Дальнего Востока: горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)*. Отдельные статьи (специальный выпуск). 2014. № 12. С. 137–149.
17. Беккер А.Т., Уманский А.М. Применение базальтопластиковой арматуры в конструкциях морских гидротехнических сооружений // *Известия ВНИИГ имени Б.Е. Веденеева*. 2016. № 282. С. 61–75.
18. Онуфриев Н.М. Усиление железобетонных конструкций промышленных зданий и сооружений. Ленинград – М.: Стройиздат, 1965.
19. Лазовский Е.Д. Экспериментально-теоретические исследования прочности изгибаемых железобетонных элементов, усиленных в зоне среза установкой дополнительной предварительно напряженной поперечной арматуры // *Вестн. Полоц. гос. ун-та. Серия Ф: Строительство. Прикладные науки*. 2013. № 16. С. 51–60.
20. СП 63.13330.2012. Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения. Актуализированная редакция СНиП 52-01-2003. М., 2013.
21. СП 295.1325800.2017. Конструкции бетонные, армированные полимерной композитной арматурой. Правила проектирования. М.: Стандартинформ, 2017.
22. ГОСТ 31938-2012. Арматура композитная полимерная для армирования бетонных конструкций. Общие технические условия. М.: Стандартинформ, 2014.
23. Okhapkin G.V., Zyuzina O.V. Approach to the restoration of the metal water conduits of hydrolic structures // *Power technology and engineering*. 2020. Vol. 53. No. 5. Pp. 542–544. <https://doi.org/10.1007/s10749-020-01112-2>
24. Dong Yang, Jiwen Zhang, Shoutan Song, Fei Zhou, Chao Wang. Experimental investigation on the creep property of carbon fiber reinforced polymer tendons under high stress levels. *Materials*. 2018. Vol. 11. Issue 11. 2273. <https://doi.org/10.3390/ma11112273>
25. СП 41.13330.2012. Бетонные и железобетонные конструкции гидротехнических сооружений. Актуализированная редакция СНиП 2.06.08-87 (с Изменением № 1). М., 2013.

References

1. Bellendir E.N., Rubin O.D., Lisichkin S.E., Zyuzina O.V. Experimental studies of prestress losses of basalt composite reinforcement as part of a concrete element. *Power technology and engineering*. 2020;(7):2–6. (In Russ.)
2. Rubin O.D., Lisichkin S.E., Nikolaev V.B., Bashkirov D.S. The features of stress-deformation state of the lock of lock chambers walls. *Vestnik MGSU (Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering)*. 2019;14(4):473–483. (In Russ.) DOI: 10.22227/1997-0935.2019.4.473-483.
3. Regan P.J. An examination of dam failures vs. age of dams. *Hydro review*. 2010(June);29(4):62–68.

4. Morgunov K.P., Ryabov G.G. Analiz vozmozhnykh prichin obrazovaniya treshchiny v levom ustoe nizhnej golovy shlyuza No. 2 Belousovskogo gidrouzla [Analysis of possible causes of establishment of a crack in the left stone of the lower head of the gateway of the blockout No. 2 of Belousovsky hydroelectric power station]. *Proektirovanie, stroitel'stvo i ekspluatatsiya gidrotekhnicheskikh sooruzhenij vodnykh putej* [Design, construction and operation of hydraulic structures of waterways]: collection of conference materials. 2017;1:115–131. (In Russ.)
5. Davidenko V.M., Shtilman V.B., Fotiev P.I. Substantiation of safety and reliability criteria for concrete and reinforced concrete building structures of hydraulic structures using modern materials and technologies for their protection and repair. *Hydrotehnika*. 2011;2(23):40–45. (In Russ.)
6. Rubin O.D., Umnova R.V., Ni V.Ye. Usilenie ekspluatiruemykh podpornykh sooruzhenij [Strengthening maintained retaining structures]. *Gidrotekhnicheskoe stroitel'stvo* [Power technology and engineering]. 1989;(12):42–45. (In Russ.)
7. Mason P.J. Dam engineering: the last 50 years, and the 50 years ahead. *Hydropower & Dams*. 2016;23(6):83–89.
8. Kreuzer H. Dam safety and monitoring. Practical discussions tackle global issues in Montreux. Hydro 2016 report. *Hydropower & Dams*. 2016;23(6):119–120.
9. Rubin O.D., Lisichkin S.E., Frolov K.E., Pashchenko F.A., Zyuzina O.V. The experimental research of the reinforced concrete retaining walls. *Prirodoobustrojstvo*. 2020;(1):72–79. (In Russ.)
10. Rubin O.D., Lisichkin S.E., Balagurov V.B., Alexandrov A.V. New technology of HES repair using reinforcement with composite materials. *Proceeding of the VNIIG*. 2016;(280):3–9. (In Russ.)
11. Hamed E., Bradford M.A. Flexural time-dependent cracking and post-cracking behaviour of FRP strengthened concrete beams. *International Journal of Solids and Structures*. 2012;49:1595–1607.
12. Zhou Y., Gou M., Zhang F., Zhang Sh., Wang D. Reinforced concrete beams strengthened with carbon fiber reinforced polymer by friction hybrid bond technique: experimental investigation. *Materials and Design*. 2013;50:130–139.
13. Selvachandran P., Anandakumar S., Muthuramu K.L. Deflection Behavior of Prestressed Concrete Beam using Fiber Reinforced Polymer (FRP) Tendon. *The Open Civil Engineering Journal*. 2016;(10):40–60.
14. Zhu H., Yang Y. External Prestressing Bridge Reinforcement Technology Review. *MATEC Web of Conferences*. 2015;22:04028.
15. Pavlović A., Donchev T., Petkova D., Limbachiya M., Almuhausen R. Pretensioned BFRP reinforced concrete beams: flexural behaviour and estimation of initial prestress losses. *MATEC Web of Conferences*. 2019;289:09001.
16. Zavgorodnev A.V., Umansky A.M., Bekker A.T., Borisov E.K. Prospects for the use of composite reinforcement in marine hydraulic engineering. *Architecture and construction of the Far East: mining information and analytical bulletin (scientific and technical journal). Selected articles (special issue)*. 2014;(12):137–149.
17. Becker A.T., Umansky A.M. Application of basalt-plastic reinforcement in the structures of offshore hydroengineering constructions. *Proceeding of the VNIIG*. 2016;(282):61–75. (In Russ.)
18. Onufriev N.M. *Usilenie zhelezobetonnykh konstruksii promyshlennykh zdaniy i sooruzhenii* [Strengthening of reinforced concrete structures of industrial buildings and structures]. Leningrad, Moscow: Stroyizdat Publ.; 1965. (In Russ.)
19. Lazouski Y.D. Experimental and theoretical study of strength of steel reinforced concrete elements reinforced the slicer area installing additional preliminary tense transverse reinforcement. *Bulletin of Polotsk State University. Series F: Building. Applied Sciences*. 2013;(16):51–60. (In Russ.)
20. SP 63.13330.2012. *Betonnye i zhelezobetonnye konstruksii. Osnovnye polozheniya. Aktualizirovannaya redaktsiya SNIp 52-01-2003* [Concrete and reinforced concrete structures. Basic provisions. Updated edition SNIp 52-01-2003]. Moscow; 2013. (In Russ.)
21. SP 295.1325800.2017. *Konstruksii betonnye, armirovannye polimernoj kompozitnoi armaturoi. Pravila proektirovaniya* [Concrete structures, reinforced with polymer composite reinforcement. Design rules]. Moscow: Standartinform Publ.; 2017. (In Russ.)
22. GOST 31938-2012. *Armaturoj kompozitnaya polimernaya dlya armirovaniya betonnykh konstruksii. Obshchie tekhnicheskie usloviya* [Composite polymer reinforcement for reinforcing concrete structures. General specifications]. Moscow: Standartinform Publ.; 2014. (In Russ.)
23. Okhapkin G.V., Zyuzina O.V. An Approach to the Restoration of Metal Water Conduits of Hydraulic Structures. *Power technology and engineering*. 2020;53(5):542–544. <https://doi.org/10.1007/s10749-020-01112-2>
24. Dong Yang, Jiwen Zhang, Shoutan Song, Fei Zhou, Chao Wang. Experimental investigation on the creep property of carbon fiber reinforced polymer tendons under high stress levels. *Materials*. 2018;11(11):2273. <https://doi.org/10.3390/ma11112273>
25. SP 63.13330.2012. *Betonnye i zhelezobetonnye konstrukcii gidrotekhnicheskikh sooruzhenij. Aktualizirovannaya redaktsiya SNIp 2.06.08-87 (s Izmeneniyem № 1)* [Concrete and reinforced concrete structures of hydraulic structures. Updated version of SNIp 2.06.08-87 (with Amendment No. 1)]. Moscow; 2013. (In Russ.)