



DOI 10.22363/1815-5235-2021-17-3-288-298
УДК 626.1

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH ARTICLE

Экспериментальные исследования напряженно-деформированного состояния железобетонных конструкций, усиленных предварительно напряженной базальтокомпозитной арматурой

О.Д. Рубин¹, С.Е. Лисичкин^{2*}, О.В. Зюзина³

¹Институт «Гидропроект» имени С.Я. Жука, Научно-исследовательский институт энергетических сооружений, Российская Федерация, 125080, Москва, Волоколамское шоссе, д. 2, стр. 1

²Инженерный центр сооружений, конструкций и технологий в энергетике, Российская Федерация, 125364, Москва, ул. Свободы, д. 35, стр. 36

³Всероссийский научно-исследовательский институт имени Б.Е. Веденеева, Российская Федерация, 195220, Санкт-Петербург, ул. Гжатская, д. 21

*cskte@mail.ru

История статьи

Поступила в редакцию: 3 марта 2021 г.

Доработана: 8 мая 2021 г.

Принята к публикации: 23 мая 2021 г.

Аннотация. *Актуальность.* В последние годы в строительстве железобетонных конструкций промышленных, гражданских и транспортных сооружений находят распространение композитные материалы. Предлагается выполнять усиление железобетонных конструкций гидротехнических сооружений предварительно напряженной базальтокомпозитной арматурой. Потребовалось экспериментальное и теоретическое обоснование технических решений по усилению железобетонных конструкций гидротехнических сооружений предварительно напряженной базальтокомпозитной арматурой. *Цель* работы заключалась в проведении комплекса экспериментально-теоретических исследований напряженно-деформированного состояния и внутренних усилий в малоармированных железобетонных конструкциях гидротехнических сооружений, усиленных предварительно напряженной базальтокомпозитной арматурой. *Методы.* Экспериментальные исследования напряженно-деформированного состояния и внутренних усилий проводились на основе малоармированных железобетонных моделей балочного типа, имеющих межблочные строительные швы, усиленных предварительно напряженной базальтокомпозитной арматурой в растянутой (сжатой) зонах моделей. Теоретические исследования напряженно-деформированного состояния и внутренних усилий проводились на основе теории железобетона. *Результаты* проведенных исследований характерных малоармированных железобетонных конструкций гидротехнических сооружений с межблочными строительными швами позволили определить этапы напряженно-деформированного состояния гидротехнических железобетонных конструкций. На основе данных экспериментально-теоретических исследований, в том числе с учетом усиления предварительно напряженной базальтокомпозитной арматурой, а также предварительно напряженными хомутами в зоне среза, была разработана методика расчета прочности малоармированных гидротехнических железобетонных конструкций с межблочными строительными швами.

Ключевые слова: гидротехнические сооружения, базальтокомпозитная арматура, предварительное напряжение, усиление конструкций, напряженно-деформированное состояние, внутренние усилия, экспериментально-теоретические исследования, методика расчета прочности

Для цитирования

Рубин О.Д., Лисичкин С.Е., Зюзина О.В. Экспериментальные исследования напряженно-деформированного состояния железобетонных конструкций, усиленных предварительно напряженной базальтокомпозитной арматурой // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2021. Т. 17. № 3. С. 288–298. <http://dx.doi.org/10.22363/1815-5235-2021-17-3-288-298>

Рубин Олег Дмитриевич, директор филиала, Институт «Гидропроект» имени С.Я. Жука, Научно-исследовательский институт энергетических сооружений, доктор технических наук; Scopus Author ID: 7004427140, eLIBRARY SPIN-код: 2720-6627.

Лисичкин Сергей Евгеньевич, заместитель генерального директора, Инженерный центр сооружений, конструкций и технологий в энергетике, доктор технических наук; Scopus Author ID: 6603919071, eLIBRARY SPIN-код: 5423-0643.

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

© Рубин О.Д., Лисичкин С.Е., Зюзина О.В., 2021



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

Experimental studies of the stress-strain state of reinforced concrete structures strengthened by prestressed basalt-composite rebar

Oleg D. Rubin¹, Sergey E. Lisichkin^{2*}, Oksana V. Zyuzina³

¹Scientific Research Institute of Energy Structures – branch of JSC “Institute Hydroproject”, 2 Volokolamskoe Shosse, bldg 1, Moscow, 125080, Russian Federation

²Engineering Center of Structures, Constructions and Technologies in Power Engineering, Ltd., 35 Svobody St, bldg 36, Moscow, 125364, Russian Federation

³B.E. Vedeneev All-Russia Research Institute of Hydraulic Engineering, 21 Gzhatskaya St, Saint Petersburg, 195220, Russian Federation

*cskte@mail.ru

Article history

Received: March 3, 2021

Revised: May 8, 2021

Accepted: May 23, 2021

Abstract. *Relevance.* In recent years, composite materials have become widespread in the construction of reinforced concrete structures for industrial, civil and transport structures. It is proposed to strengthen the reinforced concrete structures of hydraulic structures with prestressed basalt composite rebar. It took an experimental and theoretical substantiation of technical solutions to strengthen the reinforced concrete structures of hydraulic structures with prestressed basalt composite reinforcement. *The aim of the work* was to carry out a set of experimental and theoretical studies of the stress-strain state and internal forces in low-reinforced concrete structures of hydraulic structures reinforced with prestressed basalt composite rebar. *Methods.* Experimental studies of the stress-strain state and internal forces were carried out on the basis of low-reinforced concrete beam-type models with interblock construction joints, hardened with prestressed basalt composite reinforcement in the stretched (compressed) zones of the models. Theoretical studies of the stress-strain state and internal forces were carried out on the basis of the theory of reinforced concrete and structural mechanics. *Results.* As a result of the research carried out on typical low-reinforced concrete structures of hydraulic structures with interblock construction joints, the main stages of the stress-strain state of hydraulic reinforced concrete structures were formulated. Based on the data of experimental and theoretical studies, taking into account the reinforcement with prestressed basalt composite rebar, as well as with prestressed clamps in the shear zone, a method was developed for calculating the strength of low-reinforced hydrotechnical reinforced concrete structures with interblock construction joints.

Keywords: hydraulic structures, basalt composite reinforcement, prestressing, strengthening of structures, stress-strain state, internal forces, experimental and theoretical research, method for calculating the strength

For citation

Rubin O.D., Lisichkin S.E., Zyuzina O.V. Experimental studies of the stress-strain state of reinforced concrete structures strengthened by prestressed basalt-composite rebar. *Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings*. 2021;17(3):288–298. (In Russ.) <http://dx.doi.org/10.22363/1815-5235-2021-17-3-288-298>

Введение

Для разработки технических решений по усилению длительно эксплуатируемых железобетонных конструкций гидротехнических сооружений (ГТС), таких как балочные конструкции водоприемников и зданий ГЭС (ГАЭС), подпорные стены и стены камер шлюзов, фундаментные плиты водоприемников и зданий ГЭС (ГАЭС), являлось необходимым проведение комплекса экспериментально-теоретических работ по обоснованию применения базальтокомпозитной арматуры – АБК (сравнимой по стоимости со стальной арматурой), учитывающих: большую прочность (в 2,5–3 раза) АБК на разрыв и меньший вес (в 4–4,5 раза), а следовательно, упрощение технологии производства строительных и ремонтных работ, в сравнении со стальной арматурой при равном диаметре; устойчивость к щелочной среде бетона; а также важный факт, что АБК не корродирует в водной, влагонасыщенной и других агрессивных средах. При этом следовало учитывать характерные особенности массивных малоармированных железобетонных конструкций ГТС (изготовленных из бетона и арматуры невысоких классов), в первую очередь наличие межблочных строительных швов, а также особенности трещинообразования, включая наклонные трещины, выклинивающиеся из межблочных строительных швов. Учет в экспе-

Oleg D. Rubin, Director, Scientific Research Institute of Energy Structures – branch of JSC “Institute Hydroproject”, Doctor of Technical Sciences; Scopus Author ID: 7004427140, eLIBRARY SPIN-code: 2720-6627.

Sergey E. Lisichkin, Deputy General Director, Engineering Center of Structures, Constructions and Technologies in Power Engineering, Ltd., Doctor of Technical Sciences; Scopus Author ID: 6603919071, eLIBRARY SPIN-code: 5423-0643.

Oksana V. Zyuzina, engineer of the 1st category, postgraduate student, B.E. Vedeneev All-Russia Research Institute of Hydraulic Engineering; Scopus Author ID: 2-s2.0-85086440563, eLIBRARY SPIN-code: 6769-5035.

риментальных моделях и в теоретических исследованиях перечисленных характерных особенностей массивных железобетонных гидротехнических конструкций позволяет распространить результаты экспериментальных и теоретических исследований на широкий круг гидротехнических конструкций.

Методы

Проведены экспериментальные исследования, учитывающие характерные особенности железобетонных конструкций ГТС: невысокий класс бетона (до В35) и стальной арматуры (до А500); коэффициент продольного рабочего армирования $\mu < 0,01$; наличие межблочных строительных швов; нарушение сцепления рабочей стальной арматуры с бетоном в зоне размещения строительных швов как результат проявления усадочных деформаций бетона при твердении (в период строительства), а также длительной эксплуатации конструкций ГТС при температурных и знакопеременных нагрузках; особый характер трещинообразования малоармированных конструкций ГТС [1–3]. При проведении экспериментальных исследований учитывался отечественный и зарубежный опыт исследований конструкций ГТС [4–18].

Железобетонные конструкции балочного типа Б1, Б2, Б3, Б4 и Б5 с вертикальными межблочными строительными швами имели размеры: длина – 2000 мм, высота – 300 мм, ширина – 150 мм; класс бетона В30–В35.

Все опытные балки изготавливались со стальной арматурой в два приема (блочное бетонирование) для устройства межблочных строительных швов. Модели Б2–Б5 изготовлены с каналом АБК с последующим предварительным напряжением АБК на бетон, омоноличиванием канала и с последующим отпуском АБК на бетон балок после набора прочности бетона канала.

АБК в балках Б2–Б5 подвергалась предварительному напряжению на величину $0,45 \times 800 = 360$ МПа (принято: коэффициент 0,45 – п. 1.4.2 СП 63.13330.2012¹ [19]; $R_{f,n} = 800$ МПа. Предел прочности АБК при растяжении – табл. 1, п. 5.2.4 СП 295.1325800.2017² [20]) с последующим бетонированием каналов в балках.

Поперечная предварительно напряженная арматура $\varnothing 12$ устанавливалась в балках Б1 (этап 2), Б3 (этап 3), Б4 (этап 4) и Б5 (этап 2) по длине наклонных трещин, образовавшихся из межблочных строительных швов по направлению к силе $P/2$.

Конструкция опытных балок приведена на рис. 1.

Нагрузка прикладывалась вертикально ступенями посредством гидравлического домкрата и передавалась через горизонтальную траверсу в двух точках на расстоянии 310–330 мм от центра балки, при этом расстояние между силами (зона чистого изгиба) составило 620–660 мм, а расстояние между силами и опорами (пролет среза) – 500–540 мм (рис. 1).

Результаты и обсуждение

В результате проведенных экспериментов получена сила P , соответствующая разрушению бетона (табл. 1).

Анализ результатов экспериментальных исследований позволяет выделить четыре этапа работы конструкции с межблочными строительными швами на восприятие поперечных сил: первый – до образования трещин, второй – образование трещин по межблочным строительным швам и нормальных трещин, третий – образование и развитие наклонных трещин и четвертый – разрушение. Усиление железобетонных малоармированных балок ($\mu_s = 0,0056$) производилось после их разрушения посредством предварительно напряженной базальтокомпозитной арматуры ($\sigma_f = 360$ МПа), располагаемой либо в сжатой, либо в растянутой зоне конструкции.

Каждой из перечисленных стадий работы соответствует определенное напряженно-деформированное состояние конструкции, которое учитывает специфику и отражает напряженно-деформированное состояние бетона, продольной стальной и базальтокомпозитной арматуры.

Основная информация о напряженно-деформированном состоянии конструкции в процессе нагружения – это результаты экспериментов в условиях интенсивного трещинообразования и деформаций бетона и арматуры.

¹ СП 63.13330.2012. Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения. Актуализированная редакция СНиП 52-01-2003. М., 2012. 161 с.

² СП 295.1325800.2017. Конструкции бетонные, армированные полимерной композитной арматурой. Правила проектирования. М.: Стандартинформ, 2017. 55 с.

С целью изучения напряженно-деформированного состояния армированных конструкций в зоне действия поперечных сил измерялись деформации бетона и арматуры посредством использования тензорезисторов с базой $10 \div 50$ мм.

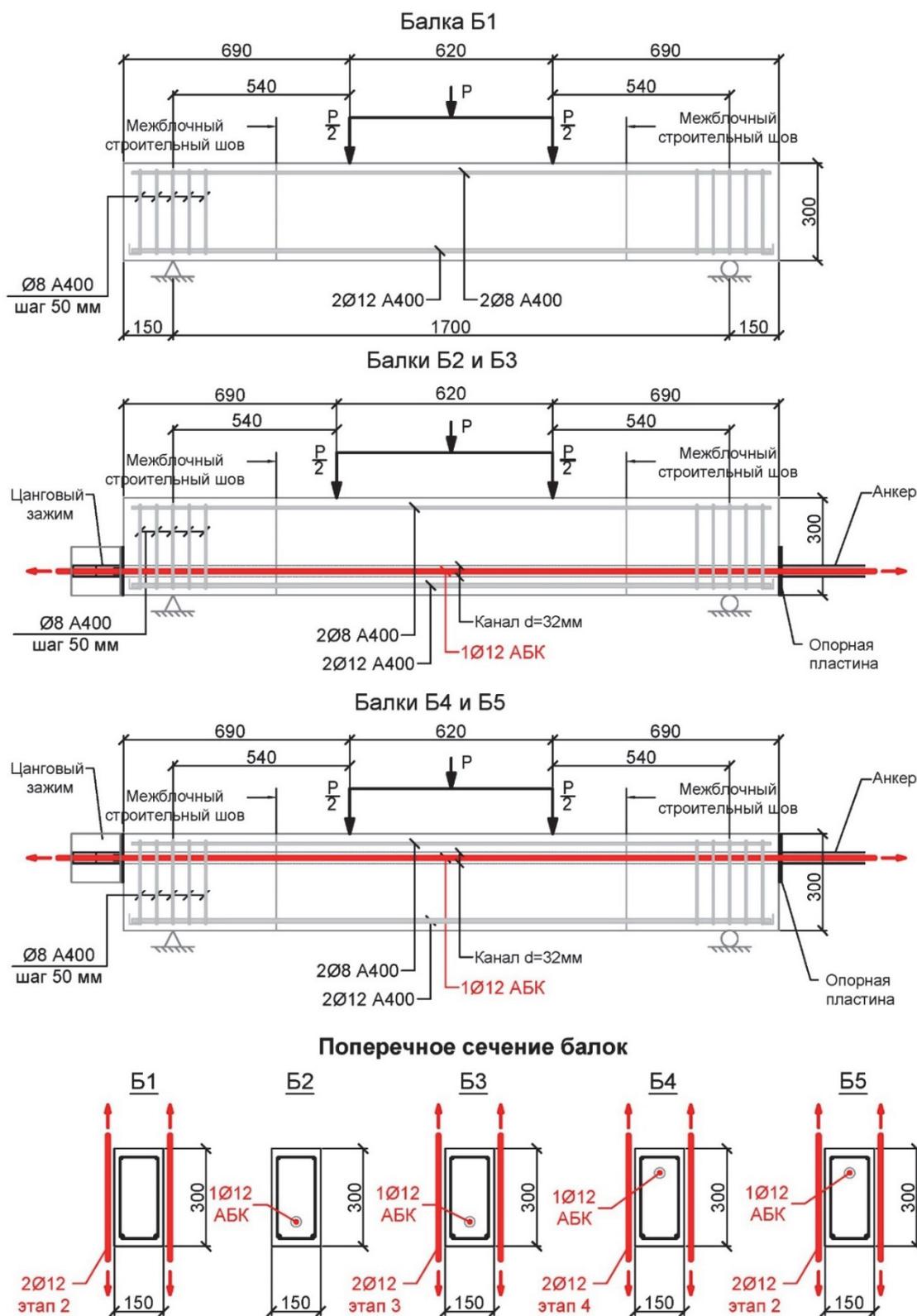


Рис. 1. Конструкции опытных малоармированных железобетонных моделей, усиленных предварительно напряженной базальтокомпозитной арматурой

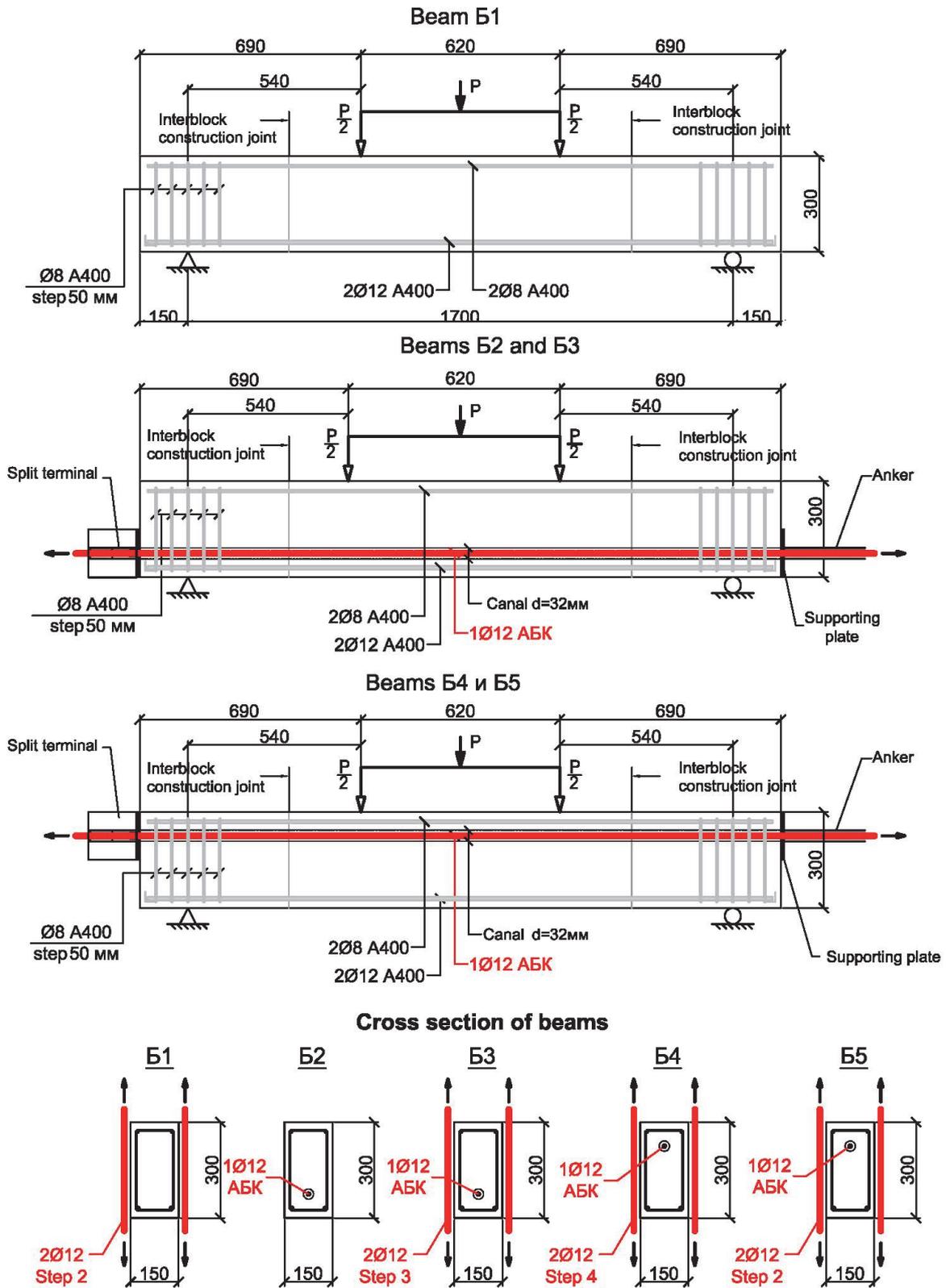


Figure 1. Structures of experimental low-reinforced concrete models reinforced with prestressed basalt composite reinforcement

Анализ результатов проведенных экспериментальных исследований и обобщение их с данными других экспериментов [19–21] позволяет следующим образом представить четыре этапа напряженно-деформированного состояния конструкции при увеличении внешней нагрузки (рис. 2).

Таблица 1

Результаты экспериментальных исследований балок

Сила P , соответствующая разрушению балки, кН	Б1 (этап 1)	Б1 (этап 2)	Б2	Б3 (этап 1)	Б3 (этап 2)	Б3 (этап 3)	Б4 (этап 1)	Б4 (этап 2)	Б4 (этап 3)	Б4 (этап 4)	Б5 (этап 1)	Б5 (этап 3)
Опытные значения силы P , кН	52,7	62,4	104,0	52,0	67,6	72,8	41,6	46,8	55,12	83,2	83,2	104,0

Table 1

The results of the experimental studies of beams

Force P , corresponding to the destruction of the beam, kN	Б1 (stage 1)	Б1 (stage 2)	Б2	Б3 (stage 1)	Б3 (stage 2)	Б3 (stage 3)	Б4 (stage 1)	Б4 (stage 2)	Б4 (stage 3)	Б4 (stage 4)	Б5 (stage 1)	Б5 (stage 3)
Experienced values of force P , kN	52.7	62.4	104.0	52.0	67.6	72.8	41.6	46.8	55.12	83.2	83.2	104.0

Этап I. В стадии работы до образования трещин конструкция ведет себя как сплошное тело из упругого материала (рис. 2, а). По нормальным сечениям деформации сжатия и растяжения бетона изменяются по линейному закону в соответствии гипотезой плоских сечений; деформации сдвига также распределяются по всей высоте нормальных сечений.

Деформации продольной арматуры происходят совместно с окружающим бетоном в соответствии с изменениями изгибающего момента.

Первые этапы нагружения конструкции характеризуются линейной зависимостью «напряжения – деформации» в бетоне, эпюры продольных сжимающих и растягивающих напряжений имеют треугольную форму. При возрастании нагрузки в зоне действия изгибающих моментов в растянутом бетоне развиваются неупругие деформации, эпюра растягивающих напряжений приобретает криволинейную форму, максимальные значения растягивающих напряжений приближаются к пределу прочности на растяжение и происходит образование нормальных трещины по межблочным строительным швам и несколько позже – в зоне действия максимальных изгибающих моментов.

После образования нормальных трещин происходит переход к этапу II напряженно-деформированного состояния (рис. 2, б).

Этап II. Образование нормальных трещин вызывает различное напряженно-деформированное состояние бетона в сечениях с трещиной и между трещинами.

Деформации сжатия и растяжения бетона в сечениях между трещинами распределяются по линейному закону с максимальными значениями у сжатой и растянутой граней; деформации сдвига также распределяются по всей высоте сечения (аналогично этапу I). Деформации сжатия и растяжения бетона в сечении с трещиной имеют линейный характер, однако они распределяются в диапазоне от сжатой грани до вершины трещины, образовавшейся в растянутой зоне. Деформации сдвига возникают в не треснувшей части бетона с максимумом примерно в средней части по высоте этой зоны. Приближаясь к сжатой грани и к вершине нормальной трещины, деформации сдвига уменьшаются. Исключения составляют трещины по межблочным строительным швам, которые в дальнейшем переходят в наклонные. Вблизи таких трещин деформации сдвига резко возрастают.

В зоне растяжения над вершиной нормальной трещины, а также в сечениях между трещинами зависимости между растягивающими напряжениями и деформациями в бетоне с ростом нагрузки становятся нелинейными и напряжения возрастают, приближаясь к предельному значению. Это вызывает дальнейшее развитие существующих трещин и образование новых нормальных трещин.

В силу малоармированности гидротехнических сооружений и конструкций эпюры сжимающих напряжений в сжатой зоне бетона имеют треугольную форму, что отражено в нормативных документах СНиП 52-01-2003³.

³ СНиП 52-01-2003. Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения. М., 2004. 29 с.

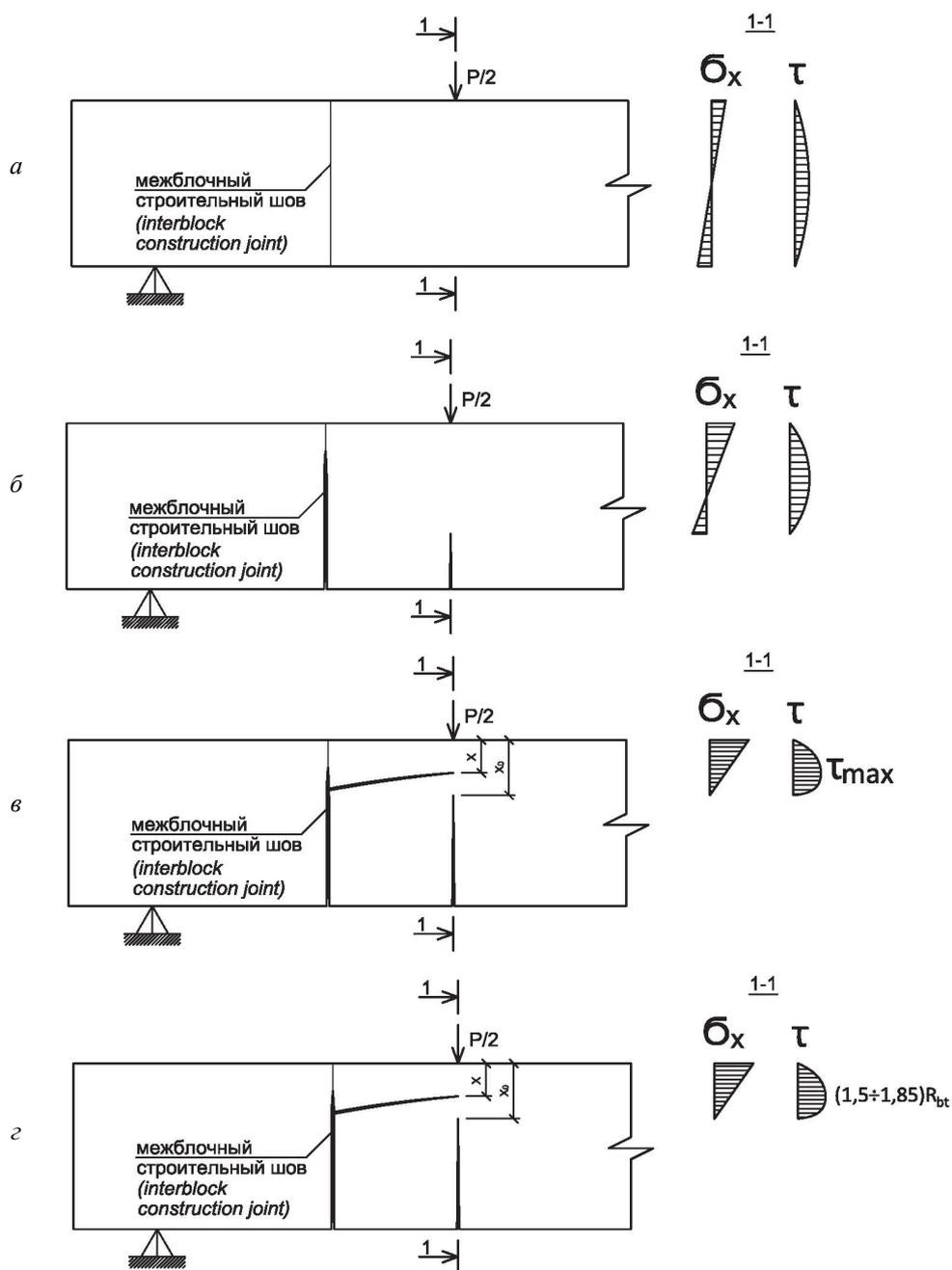


Рис. 2. Схемы напряженного состояния на этапах I–IV
 Figure 2. Diagrams of the stress state at stages I–IV

Продольная стальная арматура начинает интенсивно деформироваться после образования и по мере развития нормальных трещин.

Этап II напряженно-деформированного состояния конструкции завершается образованием наклонных трещин, выклинивающих из межблочных строительных швов.

Этап III. Появление наклонных (критических) трещин, выклинивающих из межблочных строительных швов, вызывает значительные изменения характера напряженно-деформированного состояния конструкции в целом, в том числе бетона и продольной арматуры (рис. 2, в).

Происходит перераспределение деформаций бетона по длине и по высоте конструкции, наиболее значительное вблизи критической трещины, которая по высоте нормальных сечений разделяет сжатую зону на две части. С ростом нагрузки деформации сжатия над вершиной критической наклонной трещины растут значительно быстрее, чем под ней.

После появления критических наклонных трещин деформации сдвига в нормальных сечениях перераспределяются, при этом максимум деформаций смещается к их вершинам. Деформации сдвига в сечениях с нормальными трещинами концентрируются в зоне не треснувшей части бетона, с максимумом в вершине наклонной трещины, уменьшаясь до нуля на сжатой грани.

Деформации сдвига в сечениях между нормальными трещинами также уменьшаются до нуля на сжатой грани. Окончание третьего этапа напряженно-деформированного состояния и переход к четвертому этапу (рис. 2, з) определяется тем, что конструкция перестает сопротивляться действию внешней нагрузки. В этот момент представляется необходимым произвести усиление конструкции предварительно напряженной базальтокомпозитной арматурой с расположением в растянутой (сжатой) зоне.

Этап IV. Пример: балка БЗ (этап 1) усилена предварительно напряженной БПА, расположенной в растянутой зоне, при этом (за счет усиления) нагрузка разрушения балки БЗ (этап 2) увеличилась в 1,3 раза, равно как и нагрузка разрушения балки Б4 (этап 3) по отношению к Б4 (этап 1) с расположением БПА в сжатой зоне. Разрушение произошло по сжатой зоне бетона над вершиной критической наклонной трещины.

Эпюра сжимающих напряжений в бетоне над трещиной при разрушении имеет треугольную форму с максимальными значениями у сжатой грани (что подтверждено экспериментальными данными). Эпюра касательных напряжений в нормальном сечении, проходящем через вершину критической наклонной трещины: максимум при разрушении (1,5–1,85) R_{bt} , полученный экспериментальным путем, действует в вершине наклонной трещины, уменьшаясь в направлении сжатой и растянутой граней.

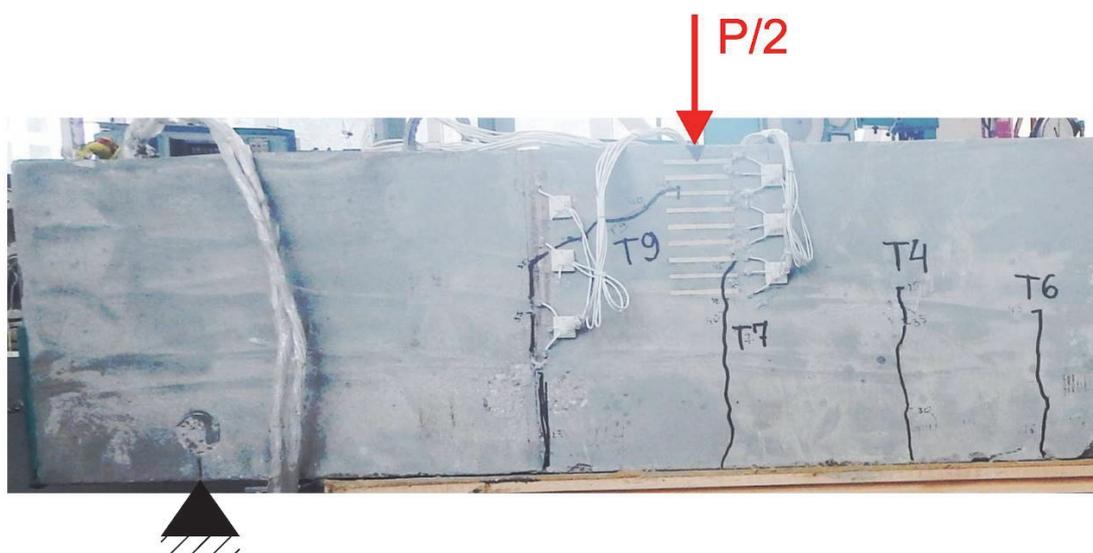


Рис. 3. Вид фрагмента опытной балки (этапы III и IV)
Figure 3. View of a fragment of the experimental beam (stages III and IV)

Основываясь на вышеизложенном, предлагается определять прочность гидротехнических малоармированных железобетонных конструкций с межблочными строительными швами, в том числе усиленных предварительно напряженной БПА, согласно следующей методике.

Поперечное усилие Q_b , воспринимаемое бетоном сжатой зоны в наклонном сечении, определяется на основе формулы (65) СП 41.13330.2012⁴ [25]:

$$Q_b = \frac{0,8\varphi_w\varphi_s\varphi_z\varphi_n\gamma_j R_{bt} b h_0}{1 + \frac{M}{Q h_0}}, \quad (1)$$

где φ_w – коэффициент влияния предварительно напряженных хомутов (стальных или из БПА) в зоне среза, принимаемый равным 1,2 в случае их дополнительной установки; φ_s – коэффициент, учитывающий влияние продольной арматуры, определяемый по формуле

⁴ СП 41.13330.2012. Бетонные и железобетонные конструкции гидротехнических сооружений (актуализированная редакция СНиП 2.06.08-87). М.: Стандартинформ, 2019. 72 с.

$$\varphi_s = 1 + \frac{50A_s}{bh_0}, \quad (2)$$

и принимаемый не более 2,0; $\varphi_3 = 1,0$ – для элементов конструкций с высотой сечения $h < 0,6$ м, 0,83 – для элементов конструкций с высотой сечения $h \geq 0,6$ м; φ_n – коэффициент, учитывающий влияние предварительно напряженной базальтокомпозитной арматуры,

$$\varphi_n = \frac{N_p}{R_{bt} \cdot b \cdot x_0}, \quad (3)$$

где N_p – усилие предварительного напряжения,

$$x_0 = K_p \cdot x, \quad (4)$$

в котором x – высота сжатой зоны элемента конструкции, вычисляемая при треугольной эпюре по формуле $x = h_0 \sqrt{\mu \cdot n} = h_0 \cdot \sqrt{\frac{A_s}{bh_0} \cdot \frac{E_s}{E_b}}$.

Коэффициент K_p , определяемый по результатам комплекса экспериментальных исследований, равен 1,5 – при расположении предварительно напряженной базальтокомпозитной арматуры в растянутой зоне элемента конструкции и 1,85 – при расположении предварительно напряженной базальтокомпозитной арматуры в сжатой зоне элемента конструкции; $\varphi_n = 1,0$ – при отсутствии предварительного напряжения; γ_j – коэффициент, учитывающий влияние межблочного строительного шва в зоне действия поперечных сил, принимаемый по табл. 2, где l_j – расстояние между сечением по шву и нормальным сечением, проходящим через конец наклонного сечения в сжатой зоне; h_j – высота сечения по шву; M и Q – изгибающий момент и поперечная сила в нормальном сечении, проходящем через конец наклонного сечения в сжатой зоне, соответственно.

Таблица 2

Значения коэффициента, учитывающего влияние межблочного строительного шва в зоне действия поперечных сил

l_j / h_j	0,45 и меньше	От 0,46 до 0,64	0,65 и выше
γ_j	1,0	$1 - [(l_j / h_j) - 0,15]$	0,80

Table 2

Values of the coefficient taking into account the influence of the interblock construction seam in the zone of transverse forces action

l_j / h_j	0.45 and less	From 0.46 to 0.64	0.65 and higher
γ_j	1.0	$1 - [(l_j / h_j) - 0.15]$	0.80

Сравнение результатов расчетов по формуле (1) с данными экспериментов показывает достаточное совпадение с отклонением до 7 %.

Заключение

С учетом результатов проведенных исследований характерных железобетонных конструкций ГТС с межблочными строительными швами сформулированы этапы (I, II, III, IV) напряженно-деформированного состояния железобетонных конструкций ГТС, которое характеризуется особенностями распределения нормальных и касательных напряжений в нормальном сечении, проходящем через вершину критической наклонной трещины, выклинивающейся из межблочного строительного шва.

На основе результатов проведенных исследований железобетонных конструкций ГТС, в том числе усиленных предварительно напряженной базальтокомпозитной арматурой (как в растянутой, так и в сжатой зонах конструкции), а также предварительно напряженными хомутами в зоне среза, разработана методика расчета прочности малоармированных железобетонных конструкций ГТС, имеющих межблочные строительные швы.

Список литературы

1. Беллендир Е.Н., Рубин О.Д., Лисичкин С.Е., Зюзина О.В. Экспериментальные исследования потерь предварительного напряжения базальтокомпозитной арматуры в составе бетонного элемента // Гидротехническое строительство. 2020. № 7. С. 2–6.
2. Рубин О.Д., Лисичкин С.Е., Зюзина О.В. Влияние базальтокомпозитной предварительно напряженной арматуры на работу малоармированных, железобетонных конструкций с межблочными строительными швами // Природообустройство. 2020. № 5. С. 50–58.
3. 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>
4. Беккер А.Т., Уманский А.М. Применение базальтопластиковой арматуры в конструкциях морских гидротехнических сооружений // Известия Всероссийского научно-исследовательского института гидротехники имени Б.Е. Веденеева. 2016. № 282. С. 61–75.
5. Завгороднев А.В., Уманский А.М., Беккер А.Т., Борисов Е.К. Перспективы применения композитной арматуры в морском гидротехническом строительстве // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2014. № S4–9. С. 137–148.
6. Рубин О.Д., Умнова Р.В. Экспериментальные исследования железобетонных конструкций при действии изгибающих моментов, продольных и поперечных сил // Сборник научных трудов Гидропроекта. 1991. Вып. 145. С. 83–95.
7. Rubin O.D., Lisichkin S.E., Kamnev N.M. Calculation of the strength of a fragment of a turbine block with a scroll casing at the Al Waqda hydro development // Hydrotechnical Construction Consultants Bureau. 1998. Vol. 29. No. 12. Pp. 721–727.
8. 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. Т. 14. № 3. С. 198–204. <https://doi.org/10.22363/1815-5235-2018-14-3-198-204>
9. 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.
10. 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.
11. 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.
12. Zhu H., Yang Y. External prestressing bridge reinforcement technology review // MATEC Web of Conferences. 2015. Vol. 22. Article number 04028.
13. Pavlović A., Donchev T., Petkova D., Limbachiya M., Almuhausen R. Pretensioned BFRP reinforced concrete beams: flexural behaviour and estimation of initial prestress losses // MATEC Web of Conferences. 2019. Vol. 2. Article number 09001.
14. Yang D., Zhang J., Song S., Zhou F., Wang Ch. Experimental investigation on the creep property of carbon fiber reinforced polymer tendons under high stress levels // Materials (Basel). 2018. Vol. 11. No. 11. Article number 2273. <https://doi.org/10.3390/ma11112273>
15. Thorhallsson E.R., Zhelyazov T., Gunnarsson A., Snaebjornsson J.T. Concrete beams reinforced with prestressed basalt bars // Concrete-Innovation and Design, fib Symposium (Copenhagen, Denmark, 18–20 May 2015). Copenhagen, 2015. 10 p.
16. Gunnarsson A., Thorhallsson E.R., Snaebjornsson J.T. Simulation of experimental research of concrete beams prestressed with BFRP tendons // Proceedings of the XXII Nordic Concrete Research Symposium. Reykjavik, Iceland, 2014. Pp. 153–156.
17. Thorhallsson E.R., Jonsson B.S. Test of prestressed concrete beams with BFRP tendons // Workshop Structural Engineering and Composites Laboratory. Reykjavik: Reykjavik University, 2012. 6 p.
18. Thorhallsson E.R., Gudmundsson S.H. Test of prestressed basalt FRP concrete beams with and without external stirrups // Proceedings from fib Symposium (Tel-Aviv, April, 2013). Tel-Aviv, 2013. Pp. 393–396.
19. Залесов А.С., Климов Ю.А. Прочность железобетонных конструкций при действии поперечных сил. Киев: Будивельник, 1989. 104 с.
20. Гольшев А.Б., Колчунов В.И., Смоляго Г.А. Экспериментальные исследования железобетонных элементов при совместном действии изгибающего момента и поперечной силы // Исследование строительных конструкций и сооружений. М., 1980. С. 26–42.
21. Залесов А.С., Рубин О.Д., Николаев В.Б. Совершенствование методики расчета прочности железобетонных элементов по наклонным сечениям // Гидротехническое строительство. 1987. № 12. С. 39–42.

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., Zyuzina O.V. The influence of the basalt composite prestressed reinforcement on the operation of low-reinforced, reinforced concrete structures with interblock construction joints. *Prirodoobustroystvo*. 2020;(5):50–58. (In Russ.)
3. 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>
4. 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.)
5. Zavgorodnev A.V., Umansky A.M., Bekker A.T., Borisov E.K. Prospects for the use of composite reinforcement in marine hydraulic engineering. *Mining Informational and Analytical Bulletin (Scientific and Technical Journal)*. 2014;(S4-9):137–148.
6. Rubin O.D., Umnova R.V. Experimental studies of reinforced concrete structures under the action of bending moments, longitudinal and transverse forces. *Collection of Scientific Works of Hydroproject*. 1991;(145):83–95. (In Russ.)
7. Lisichkin S.E., Rubin O.D., Kamnev N.M. Calculation of the strength of a fragment of a turbine block with a scroll casing at the Al Waqda hydro development. *Hydrotechnical Construction Consultants Bureau*. 1998;29(12):721–727.
8. Rubin O.D., Lisichkin S.E., Frolov K.E. Experimental investigations of reinforced concrete structures of hydraulic structures with block seams, enhanced by the external reinforcement system. *Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings*. 2018;14(3):198–204. (In Russ.) <https://doi.org/10.22363/1815-5235-2018-14-3-198-204>
9. 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.
10. 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.
11. 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.
12. Zhu H., Yang Y. External prestressing bridge reinforcement technology review. *MATEC Web of Conferences*. 2015;22:04028.
13. 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.
14. Yang D., Zhang J., Song S., Zhou F., Wang Ch. Experimental investigation on the creep property of carbon fiber reinforced polymer tendons under high stress levels. *Materials*. Materials (Basel). 2018;11(11):2273. <https://doi.org/10.3390/ma11112273>
15. Thorhallsson E.R., Zhelyazov T., Gunnarsson A., Snaebjornsson J.T. Concrete beams reinforced with prestressed basalt bars. *Concrete-Innovation and Design, fib Symposium (Copenhagen, Denmark, 18–20 May 2015)*. Copenhagen, 2015.
16. Gunnarsson A., Thorhallsson E.R., Snaebjornsson J.T. Simulation of experimental research of concrete beams prestressed with BFRP tendons. *Proceedings of the XXII Nordic Concrete Research Symposium*. Reykjavik, Iceland; 2014. p. 153–156.
17. Thorhallsson E.R., Jonsson B.S. Test of prestressed concrete beams with BFRP tendons. *Workshop Structural Engineering and Composites Laboratory*. Reykjavik: Reykjavik University; 2012.
18. Thorhallsson E.R., Gudmundsson S.H. Test of prestressed basalt FRP concrete beams with and without external stirrups. *Proceedings from fib Symposium (Tel-Aviv, April, 2013)*. Tel-Aviv; 2013. p. 393–396.
19. Zalesov A.S., Klimov Yu.A. *The strength of reinforced concrete structures under the action of transverse forces*. Kyiv: Budivel'nyk Publ.; 1989. (In Russ.)
20. Golyshv A.B., Kolchunov V.I., Smolyago G.A. Experimental studies of reinforced concrete elements under the combined action of a bending moment and shear force. *Investigation of Engineering Structures*. Moscow; 1980. (In Russ.)
21. Zalesov A.S., Rubin O.D., Nikolayev V.B. Improvement of the methodology for calculating the strength of reinforced concrete elements on inclined sections. *Power Technology and Engineering*. 1987;(12):39–42. (In Russ.)