

12. Соломатин С.В. Учёт вязкопластических свойств льда для оптимизации проектных решений морских нефтегазопромысловых сооружений в заливе Шарапов Шар. // Гидротехническое строительство. – 2019. – № 11. – С. 16-21.

13. G. Timco. Proceedings of the 16th IAHR International Symposium on Ice, 2, Ice Strength During the Melt Season, pp. 187-193, 2002.

14. ISO/DIS19906 “Petroleum and natural gas industries – Arctic offshore structures”. 2010. 466 с.

#### Критерии авторства

Соломатин С.В., Козлов Д.В. выполнили теоретические исследования, на основании которых провели обобщение и написали рукопись. Соломатин С.В., Козлов Д.В. имеют на статью авторское право и несут ответственность за плагиат.

#### Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликтов интересов

Статья поступила в редакцию: 20.01.2021 г.

Одобрена после рецензирования 16.02.2021 г.

Принята к публикации 19.02.2021 г.

12. Solomatin S.V. Uchet vyazkoplasticheskikh svoystv ljda dlya optimizatsii projektnykh reshenij morskikh neftegazopromyslovykh sooruzhenij v zalive Sharapov Shar // Gidrotehnicheskoe stroitelstvo. – 2019. – № 11. – S. 16-21.

13., G. Timco. Proceedings of the 16<sup>th</sup> IAHR International Symposium on Ice, 2, Ice Strength During the Melt Season, pp. 187-193, 2002.

14. ISO/DIS19906 “Petroleum and natural gas industries – Arctic offshore structures”. 2010. 466 с.

#### Authorship criteria

Solomatin S.V., Kozlov D.V. performed theoretical studies, on the basis of which they conducted a generalization and wrote the manuscript. Solomatin S.V., Kozlov D.V. have a copyright on the article and are responsible for plagiarism.

#### Conflict of interest

The authors declare that there are no conflicts of interest

The article was submitted to the editorial office 20.01.2021

Approved after review 16.02.2021

Accepted for publication 26.02.2021

Оригинальная статья

УДК 502/504:626.01:004.05

DOI: 10.26897/1997-6011-2021-1-53-62

## ПРОЧНОСТЬ МАЛОАРМИРОВАННЫХ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ С МЕЖБЛОЧНЫМИ СТРОИТЕЛЬНЫМИ ШВАМИ, УСИЛЕННЫХ ПРЕДВАРИТЕЛЬНО НАПРЯЖЕННОЙ БАЗАЛТОКОМПОЗИТНОЙ АРМАТУРОЙ

**РУБИН ОЛЕГ ДМИТРИЕВИЧ<sup>1</sup>**, д-р техн. наук, директор филиала

[o.rubin@hydroproject.ru](mailto:o.rubin@hydroproject.ru)

eLIBRARYSPIN-код: 2720-6627

**ЛИСИЧКИН СЕРГЕЙ ЕВГЕНЬЕВИЧ<sup>2</sup>**, д-р техн. наук, главный научный сотрудник

[eskte@mail.ru](mailto:eskte@mail.ru)

**ЗЮЗИНА ОКСАНА ВАЛЕРЬЕВНА<sup>2</sup>**, аспирант

[zyuzinaov@vniig.ru](mailto:zyuzinaov@vniig.ru)

<sup>1</sup> Филиал АО «Проектно-изыскательский и научно-исследовательский институт «Гидропроект» им. С.Я. Жука» – «Научно-исследовательский институт энергетических сооружений»; 125080, Москва, Волоколамское ш, 2, Россия

<sup>2</sup> «ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева»; 195220, Санкт-Петербург, Гжатская, 21, Россия

Многие малоармированные железобетонные конструкции эксплуатируемых гидротехнических сооружений нуждаются в усилении. Традиционные методы усиления (железобетоном, металлоконструкциями и др.) имеют существенные недостатки. Начинает распространяться метод усиления системами внешнего армирования на основе углеродного волокна, который эффективен в тех случаях, когда имеется доступ к растянутой зоне усиливаемых конструкций. Авторами предлагается усиливать малоармированные железобетонные конструкции эксплуатируемых гидротехнических сооружений предварительно напряженной базальтокомпозитной арматурой, размещаемой

в заранее пробуренных отверстиях в бетоне усиливаемых конструкций. Для обоснования предлагаемых технических решений был проведен комплекс экспериментальных исследований характерных малоармированных железобетонных конструкций гидротехнических сооружений (в том числе имеющих межблочные строительные швы), усиленных предварительно напряженной базальтокомпозитной арматурой. Результаты проведенных экспериментальных исследований показали эффективность усиления малоармированных железобетонных конструкций эксплуатируемых гидротехнических сооружений с межблочными строительными швами посредством предварительно напряженной: продольной базальтокомпозитной арматуры и поперечной арматуры.

**Ключевые слова:** гидротехнические сооружения, малоармированные железобетонные конструкции, усиление конструкций, базальтокомпозитная арматура, предварительное напряжение, экспериментальные исследования

**Формат цитирования:** Рубин О.Д., Лисичкин С.Е., Зюзина О.В. Прочность малоармированных железобетонных конструкций с межблочными строительными швами, усиленных предварительно напряженной базальтокомпозитной арматурой // Природообустройство. – 2021. – № 1. – С. 53-62. DOI: 10.26897/1997-6011-2021-1-53-62.

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

Original article

## STRENGTH OF LOW-REINFORCED CONCRETE STRUCTURES WITH THE INTERBLOCK CONSTRUCTION JOINTS REINFORCED BY PRESTRESSED BASALT-COMPOSITE BARS

**RUBIN OLEG DMITRIEVICH**<sup>1</sup>, doctor of technical sciences, branch director

o.rubin@hydroproject.ru  
eLIBRARYSPIN-code: 2720-6627

**LISICHKIN SERGEJ EVGENJEVICH**<sup>✉1</sup>, doctor of technical sciences, chief research officer  
ecshte@mail.ru

**ZYUZINA OKSANA VALERJEVNA**<sup>2</sup>, post graduate student

zyuzinaov@vniig.ru

<sup>1</sup>Branch of JSC "Design and Survey and Research Institute "Gidroproekt" named after S.Ya. Zhuk – "Research Institute of Power Structures"; Russia, 125080, Moscow, Volokolamsk sh., 2

<sup>2</sup>"VNIIG named after B.E. Vedenev"; 195220, Saint-Petersburg, Gzhatskaya, 21, Russia

*Many slightly reinforced concrete structures of operating hydraulic structures need strengthening. Traditional methods of strengthening (by reinforced concrete, metal structures, etc.) have significant disadvantages. A method of strengthening by external reinforcement systems based on carbon fiber which is effective in cases where there is an access to the tension zone of the reinforced structures begins to spread. The authors propose to strengthen slightly reinforced concrete structures of the operated hydraulic structures with pre-stressed basalt composite reinforcement placed in the pre-drilled holes in the concrete of the reinforced structures. To substantiate the proposed technical solutions there was carried out a set of experimental studies of characteristic slightly reinforced concrete structures of hydraulic facilities (including those with inter-block construction joints) reinforced with pre-stressed basalt composite reinforcement. The results of experimental studies have shown the effectiveness of strengthening low-reinforced concrete structures of operating hydraulic facilities with inter block construction joints by means of pre-stressed: longitudinal basalt composite reinforcement and transverse reinforcement.*

**Keywords:** hydraulic structures, slightly reinforced concrete structures, strengthening of structures, basalt composite reinforcement, pre-stressing, experimental research

**Format of citation:** Rubin O.D., Lisichkin S.E., Zyuzina O.V. Strength of low-reinforced concrete structures with the interblock construction joints reinforced by prestressed basalt-composite bars // Prirodobustrojstvo. – 2021. – № 1. – С. 53-62. DOI: 10.26897/1997-6011-2021-1-53-62.

**Введение.** В настоящее время усиление малоармированных железобетонных эксплуатируемых гидротехнических сооружений (ГТС) производится ремонтом (частичной заменой) бетона; частичной заменой прокорродированной стальной арматуры; добетонкой (набетонкой) конструкции; созданием металлических обойм, шпренгельных систем и контрофоров.

Вместе с тем распространяется метод усиления системами внешнего армирования на основе тканей и ламелей из углеродного волокна: Баксанская ГЭС (железобетонные конструкции здания ГЭС), Эзминская ГЭС (металлические напорные водоводы), Загорская ГАЭС-2 (железобетонные конструкции здания ГАЭС-2) и др. При этом указанный метод применим только для тех конструкций, к растянутой зоне которых имеется доступ для устройства системы внешнего армирования. Вместе с тем в подпорных стенах, устоях, стенах шлюзов и других ГТС со стороны растянутой зоны имеется грунтовая засыпка практически на всю высоту этих железобетонных сооружений, что исключает эффективное применение внешнего армирования.

Для разработки технических решений по усилению длительно эксплуатируемых железобетонных конструкций ГТС стало необходимым проведение комплекса мероприятий по обоснованию применения базальтокомпозитной арматуры (АБК, сравнимой по стоимости со стальной арматурой), учитывающих: большую прочность (в 2,5-3 раза) АБК на разрыв в сравнении со стальной арматурой при равном диаметре; устойчивость АБК к щелочной среде бетона; вес (легкость) АБК, меньший в сравнении со стальной в 4-4,5 раза при равном диаметре (упрощение технологии производства строительных и ремонтных работ); а также тот факт, что АБК не корродирует в водной, влагонасыщенной и в других агрессивных средах.

Следует упомянуть, что исследования по применению композитной арматуры (без предварительного напряжения) в гидротехническом строительстве проводились под руководством профессора А.Т. Беккера [1].

Для достижения вышеуказанной цели 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.

При проведении экспериментальных исследований был учтен опыт исследований железобетонных конструкций ГТС, в том числе усиленных композитными материалами [2-6].

**Материалы и методы исследований.** Настоящая работа является продолжением исследований [7-9]. Для исследований применялась апробированная методика физического моделирования железобетонных конструкций ГТС.

Были изготовлены железобетонные модели балочного типа Б1, Б2, Б3, Б4 и Б5 с вертикальными межблочными строительными швами.

Проектные размеры опытных балок: длина – 2000 мм; высота – 300 мм; ширина – 150 мм; класс бетона В30 ÷ В35.

Тип испытания и характеристики опытных балок представлены в таблице 1.

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  $0,45 \cdot 800 = 360$  МПа (принято: коэффициент 0,45 – п. 1.4.2 СП 63.13330.2012 [10];  $R_{f, n} = 800$  МПа. Предел прочности АБК при растяжении – таблица 1, п. 5.2.4 СП 295.1325800.2017 [11]) с последующим бетонированием каналов в балках.

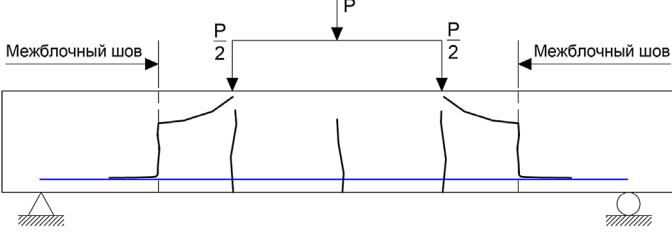
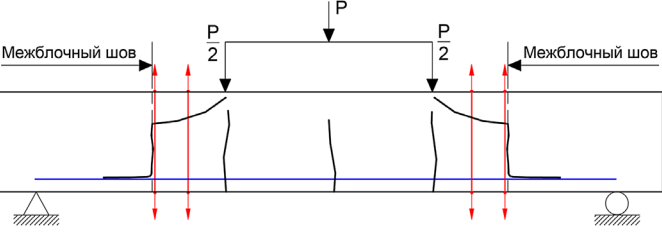
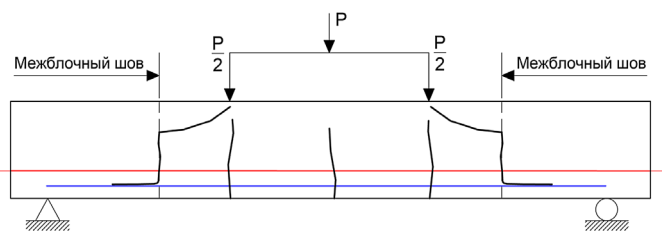
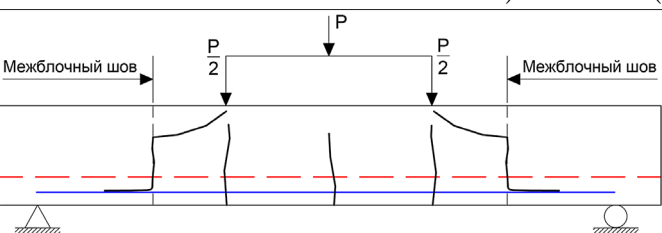
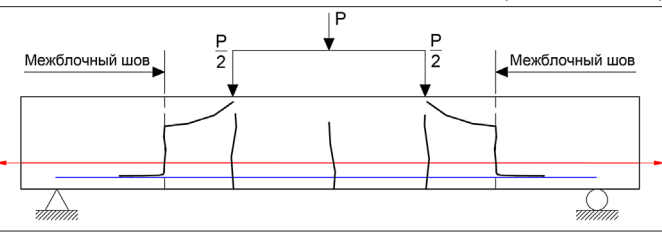
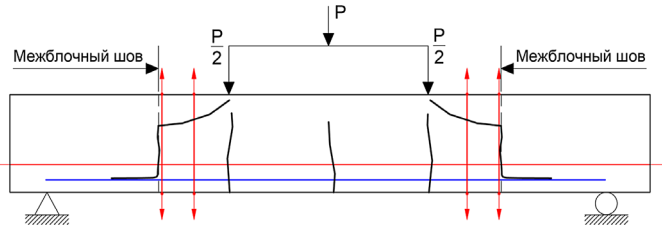
Поперечная предварительно напряженная арматура Ø12 устанавливалась в балках Б1 (этап 2), Б3 (этап 3), Б4 (этап 4) и Б5 (этап 2) по длине наклонных трещин, образовавшихся из межблочных строительных швов по направлению к силе P/2.

Конструкция опытных балок представлена на рисунке 1.

## Тип испытания балок

Table 1

## Type of beams testing

<p><b>Во всех балках установлено базовое продольное армирование в виде стальной арматуры 2Ø12 класса А400 в растянутой зоне; коэффициент продольного армирования <math>\mu_s = 0,0056</math>, также во всех балках имеется наличие двух межблочных строительных швов</b></p> <p><i>All beams have a base longitudinal reinforcement in the form of a steel armature Ø12 of the A400 class in the stretched area; the longitudinal reinforcement factor <math>\mu_s = 0.0056</math>, as well as in all beams there are 2 inter-block construction joints</i></p>		
<p>1) Балка Б1 (Этап 1):</p> 		
<p>2) Балка Б1 (Этап 2)</p> 	<p><b>Предварительно напряженная поперечная арматура Ø12, установленная по длине наклонных трещин, образовавшихся из межблочных строительных швов (балка 1, этап 1)</b></p> <p><i>Pre-stressed transverse armature Ø12, set along the length of sloping cracks formed from inter-block construction joints (beam 1, stage 1)</i></p>	
<p>3) Балка Б2</p> 		<p><b>Предварительно напряженная продольная базальтокомпозитная арматура (АБК) 1Ø12 с омоноличенным каналом в растянутой зоне балки; коэффициент продольного армирования <math>\mu_f = 0,0033</math></b></p> <p><i>Pre-stressed longitudinal basalt composite armature (АБК) 1Ø12 with a monolithic channel in the stretched beam area; longitudinal reinforcement ratio <math>\mu_f = 0.0033</math></i></p>
<p>4) Балка Б3 (Этап 1)</p> 		<p><b>Наличие канала Ø32 в растянутой зоне балки для последующей установки 1Ø12 АБК</b></p> <p><i>Availability of channel Ø32 in the stretched beam area for the further setting 1Ø12 АБК</i></p>
<p>5) Балка Б3 (Этап 2)</p> 	<p><b>Предварительно напряженная АБК 1Ø12 с омоноличенным каналом в растянутой зоне балки, <math>\mu_f = 0,0033</math> (балка 3, этап 1)</b></p> <p><i>Pre-stressed АБК 1Ø12 with a monolithic channel in the stretched beam area; <math>\mu_f = 0.0033</math> (beam 3, stage 1)</i></p>	
<p>6) Балка Б3 (Этап 3)</p> 	<p><b>Предварительно напряженная поперечная арматура Ø12, установленная по длине наклонных трещин, образовавшихся из межблочных строительных швов (балка 3, этап 2)</b></p> <p><i>Prestressed transverse reinforcement Ø12, installed along the length of the inclined cracks formed from the interblock construction joints (beam 3, stage 2)</i></p>	



7) Балка Б4 (Этап 1)	
	<p><b>Наличие канала Ø32 в сжатой зоне балки для последующей установки 1Ø12АБК</b></p> <p><i>Availability of channel Ø32 in the compressed beam area for the further setting 1Ø12АБК</i></p>
8) Б4 (Этап 2)	
	<p><b>Предварительно напряженная АБК 1Ø12 с неомонолитичным каналом Ø32 в сжатой зоне балки (балка 4, этап 1)</b></p> <p><i>Pre-stressed АБК 1Ø12 with a non-monolithic channel Ø32 in the compressed beam area (beam 4, stage 1)</i></p>
9) Балка Б4 (Этап 3)	
	<p><b>Предварительно напряженная АБК 1Ø12 с омоноличенным каналом в сжатой зоне балки (балка 4, этап 2)</b></p> <p><i>Forspændt АБК 1Ø12 med en homolichet kanal i den komprimerede beamone af strålen (stråle 4, trin 2)</i></p>
10) Балка Б4 (Этап 4)	
	<p><b>Предварительно напряженная поперечная арматура Ø12, установленная по длине наклонных трещин, образовавшихся из межблочных строительных швов (балка 4, этап 3)</b></p> <p><i>Forspændt tværgående forstærkning Ø12, installeret langs længden af de skrå revner dannet fra interblockkonstruktionsfuger (bjælke 4, trin 3)</i></p>
11) Балка Б5 (Этап 1)	
	<p><b>Предварительно напряженная АБК 1Ø12 с омоноличенным каналом в сжатой зоне балки</b></p> <p><i>Pre-stressed АБК 1Ø12 with a monolithic canal in the compressed beam area</i></p>
12) Балка Б5 (Этап 2)	
	<p><b>Предварительно напряженная поперечная арматура Ø12, установленная по длине наклонных трещин, образовавшихся из межблочных строительных швов (балка 5, этап 1)</b></p> <p><i>Pre-stressed transverse reinforcement Ø12, set along the length of sloping cracks formed from inter block construction joints (beam 5, stage 1)</i></p>

Необходимо отметить, что:

1) при испытаниях опытные балки опирались на подвижную (катковую) и неподвижную (ножевую) опоры, расположенные на расстоянии 150 мм от торцов;

2) 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).

Опытные балки оснащались контрольно-измерительной аппаратурой (КИА) для измерения ширины раскрытия трещин и межблочных строительных швов, прогибов, деформаций бетона, стальной арматуры и АБК. Для этого использовались индикаторы часового типа и тензорезисторы с базой 10-50 мм.

**Результаты и обсуждение.** В процессе экспериментальных исследований получены перечисленные ниже основные результаты.

В опытных балках зафиксирован следующий характер трещинообразования: после раскрытия вертикальных межблочных швов при нагрузках, представленных в таблице 2, произошло образование (выклинивание) наклонных трещин по направлению к приложенным силам  $P/2$  (на расстоянии  $X_{III} = 0,24 \cdot h_{III} - 0,34 \cdot h_{III}$  от сжатой грани балок).

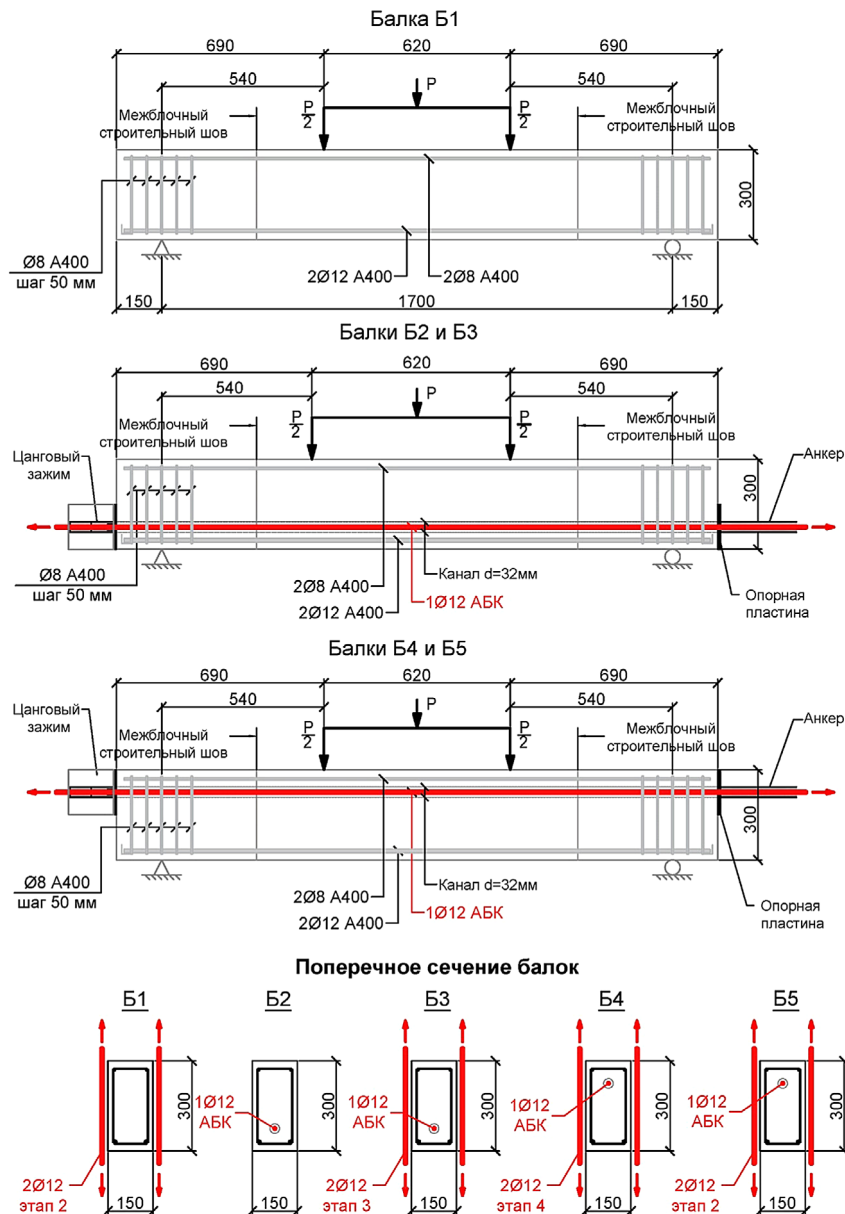


Рис. 1. Конструкция опытных балок

Fig. 1. Structure of tested beams

Под действием нагрузки, близкой к разрушающей, образовались трещины вдоль продольной рабочей арматуры по направлению «от межблочного шва к опоре» (нарушение

сцепления арматуры с бетоном в растянутой зоне балок). На участке между силами в зоне «чистого изгиба» образовалась система вертикальных нормальных трещин (рис. 2).

Из анализа результатов испытания балок Б1 ÷ Б5 (табл. 2, рис. 3) следует, что:

1. Сила, соответствующая разрушению не усиленных предварительно напряженной АБК балок Б1 (Этап 1), Б3 (Этап 1) и Б4 (Этап 1), имеющих рабочее продольное армирование в виде стальной арматуры 2Ø12 класса А400 в растянутой зоне балок, при наличии двух межблочных строительных швов, изменяется в сторону уменьшения:  $P = 57,2$  кН;  $52,0$  кН и  $41,6$  кН соответственно. При этом в балке Б3 (Этап 1) канал Ø32 расположен в растянутой зоне, а в балке Б4 (Этап 1) – в сжатой зоне. Все три вышеуказанные балки разрушились хрупко по наклонной трещине, образовавшейся (выклинившейся) из межблочного строительного шва от совместного действия изгибающего момента и поперечной силы.

2. Дальнейшие испытания балки Б1 (Этап 2), усиленной предварительно напряженной до 50 МПа поперечной арматурой диаметром 12 мм и установленной по длине наклонных трещин, показали увеличение силы, соответствующей разрушению балки, до  $P = 62,4$  кН, то есть в  $62,4/57,2 = 1,09$  раза.

Таким образом, была полностью восстановлена прочность разрушенной балки Б1 (Этап 1).

3. С целью получения максимальных значений разрушающей силы были проведены испытания балок Б2 и Б5 (Этап 1), отличающихся тем, что в балке Б2 предварительно напряженная АБК с омоноличенным каналом располагалась в растянутой зоне, а в балке Б5 (Этап 1) – в сжатой зоне. Нехрупкое разрушение балок произошло при  $P = 104,0$  кН – Б2 и при  $P = 83,2$  кН – Б5 (Этап 1) соответственно.

Снижение разрушающей силы  $P$  в  $104,0/83,2 = 1,25$  раза объясняется перенапряжением сжатой зоны бетона в балке Б5 (Этап 1) от совместного действия предварительного напряжения АБК и сжатия при действии изгибающего момента. Следует отметить, что сила  $P$ , соответствующая разрушению балок Б2 и Б5 (Этап 1) со стальной и предварительно напряженной АБК, значительно превышает силу  $P$  для балок только со стальной арматурой: Б1 (Этап 1), Б3 (Этап 1) и Б4 (Этап 1) – в  $1,45 ÷ 2,5$  раза.

Таблица 2

## Результаты экспериментальных исследований балок

Table 2

## Results of experimental investigations of beams

№№ п.п. it-s	Опытные значения силы $P$ (кН) Test values of force $P$ (кН)	Б1 (Этап 1) (Stage 1)	Б1 (Этап 2) (Stage 2)	Б2	Б3 (Этап 1) (Stage 1)	Б3 (Этап 2) (Stage 2)	Б3 (Этап 3) (Stage 3)	Б4 (Этап 1) (Stage 1)	Б4 (Этап 2) (Stage 2)	Б4 (Этап 3) (Stage 3)	Б4 (Этап 4) (Stage 4)	Б5 (Этап 1) (Stage 1)	Б5 (Этап 2) (Stage 2)
1	Сила $P$ , соответствующая образованию наклонных трещин из межблочных строительных швов <i>Force <math>P</math> corresponding to the formation of sloping cracks from interblock construction joints</i>	46,8	46,8*	67,6	44,2	44,2*	44,2*	39,0	39,0*	39,0*	39,0*	40,3	40,3*
2	Сила $P$ , соответствующая разрушению балки <i>Force <math>P</math> corresponding to the beam destruction</i>	57,2	62,4	104,0	52,0	67,6	72,8	41,6	46,8	55,12	83,2	83,2	104,0
3	Характер разрушения балки <i>Character of beam destruction</i>	Хрупкое <i>Brittle</i>	Не хрупкое <i>Non-brittle</i>	Не хрупкое <i>Non-brittle</i>	Хрупкое <i>Brittle</i>	Не хрупкое <i>Non-brittle</i>	Не хрупкое <i>Non-brittle</i>	Хрупкое <i>Brittle</i>	Не хрупкое <i>Non-brittle</i>	Не хрупкое <i>Non-brittle</i>	Не хрупкое <i>Non-brittle</i>	Не хрупкое <i>Non-brittle</i>	Не хрупкое <i>Non-brittle</i>

\*Наклонные трещины образовались из межблочных строительных швов при испытании балок Б1, Б3, Б4 и Б5 на этапе 1.

\*Sloping cracks were formed from interblock construction joints at testing beams Б1, Б3, Б4 and Б5 at the stage 1.

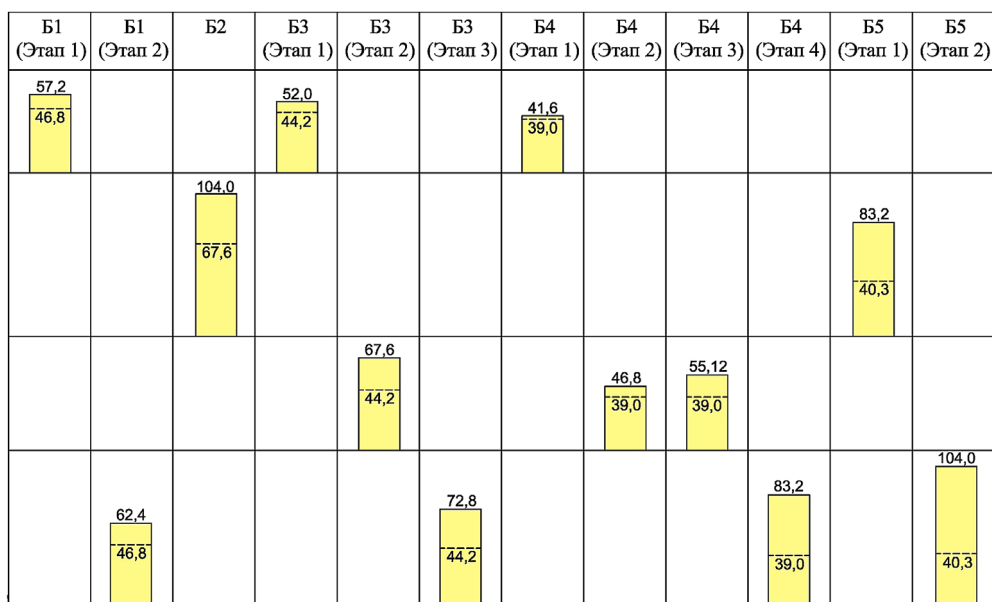


Рис. 3. Диаграмма изменения сил  $P$  (кН), соответствующих образованию наклонных трещин из межблочных швов и разрушению балок

Fig. 3. Chart of forces  $P$  (kN) changes, corresponding to the formation of sloping cracks from the interblock joints and the destruction of beams

4. Дальнейшее испытание балки Б5 продолжено на Этапе 2: была установлена предварительно напряженная поперечная арматура  $\varnothing 12$ , которая обеспечила повышение  $P$  до 104,0 кН

5. Испытания балки Б3, проведенные последовательно в три этапа:

этап 1 – рабочее продольное армирование – стальная арматура 2 $\varnothing 12$  класса А400 в растянутой зоне балки, наличие канала  $\varnothing 32$  в растянутой зоне балки;

этап 2 – рабочее продольное армирование – стальная арматура 2 $\varnothing 12$  класса А400 в растянутой зоне балки, предварительно напряженная АБК 1 $\varnothing 12$  с омоноличенным каналом  $\varnothing 32$  в растянутой зоне балки;

этап 3 – рабочее продольное армирование – стальная арматура 2 $\varnothing 12$  класса А400 в растянутой зоне балки, предварительно напряженная АБК 1 $\varnothing 12$  с омоноличенным каналом в растянутой зоне балки; предварительно напряженная поперечная арматура  $\varnothing 12$ , установленная по длине наклонных трещин, –

показали следующее.

От этапа к этапу происходило увеличение силы  $P$ , соответствующей разрушению балки: Б3 (Этап 1) –  $P = 52,0$  кН; Б3 (Этап 2) –  $P = 67,6$  кН; Б3 (Этап 3) –  $P = 72,8$  кН.

Таким образом, при усилении разрушенной хрупко балки Б3 (Этап 1) предварительно напряженной АБК с омоноличенным каналом в растянутой зоне балки и предварительно напряженной поперечной

арматурой полностью (с запасом в 30 ÷ 40%) восстановлена прочность балки Б3.

6. Испытания балки Б4, проведенные последовательно в четыре этапа:

этап 1 – рабочее продольное армирование – стальная арматура 2 $\varnothing 12$  класса А400 в растянутой зоне балки, наличие канала  $\varnothing 32$  в сжатой зоне балки;

этап 2 – рабочее продольное армирование – стальная арматура 2 $\varnothing 12$  класса А400 в растянутой зоне балки, предварительно напряженная АБК 1 $\varnothing 12$  с неомоноличенным каналом в сжатой зоне балки;

этап 3 – рабочее продольное армирование – стальная арматура 2 $\varnothing 12$  класса А400 в растянутой зоне балки, предварительно напряженная АБК 1 $\varnothing 12$  с омоноличенным каналом в сжатой зоне балки;

этап 4 – рабочее продольное армирование – стальная арматура 2 $\varnothing 12$  класса А400 в растянутой зоне балки, предварительно напряженная АБК 1 $\varnothing 12$  с омоноличенным каналом в сжатой зоне балки, предварительно напряженная поперечная арматура  $\varnothing 12$ , установленная по длине наклонных трещин, –

показали следующее.

От этапа к этапу происходило увеличение силы  $P$ , соответствующей разрушению балки: Б4 (Этап 1) –  $P = 41,6$  кН; Б4 (Этап 2) –  $P = 46,8$  кН; Б4 (Этап 3) –  $P = 55,12$  кН; Б4 (Этап 4) –  $P = 83,2$  кН.

Таким образом, при усилении разрушенной хрупко балки Б4 (Этап 1) предварительно



напряженной АБК с неомоноличным и омоноличным каналом в сжатой зоне балки и предварительно напряженной поперечной арматурой полностью (с запасом в  $12,5 \div 100\%$ ) восстановлена прочность балки Б4.

Необходимо также отметить, что испытание балки Б4 на этапе 2 подтвердили возможность усиления малоармированных железобетонных конструкций ГТС с межблочными строительными швами посредством применения неомоноличной предварительно напряженной АБК с целью создания регулируемой во времени системы усиления:  $P = 41,6$  кН для Б4 (Этап 1) и  $P = 46,8$  кН для Б4 (Этап 2).

### Выводы и рекомендации

1. Сравнение расчетного поперечного усилия  $Q_b$ , воспринимаемого бетоном сжатой зоны в наклонном сечении, определенного по СП 41.13330.2012 «Бетонные и железобетонные конструкции гидротехнических сооружений» (Актуализированная редакция СНиП 2.06.08-87, п. 8.21), с результатами экспериментальных исследований (табл. 2, рис. 3) указывает на большую в 1,0-1,55 раза прочность усиленных балок

### Библиографический список

1. Беккер А.Т., Уманский А.М. Применение базальтопластиковой арматуры в конструкциях морских гидротехнических сооружений // Известия Всероссийского научно-исследовательского института гидротехники им. Б.Е. Веденеева. – 2016. – № 282. – С. 61-75.
2. 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.
3. Рубин О.Д., Захаров И.Б., Лисичкин С.Е. Оценка состояния автодорожного моста Павловской ГЭС и расчетно-экспериментальное обоснование мероприятий по его усилению // Энергетическое строительство. – 1994. – № 9. – С. 47-50.
4. Лисичкин С.Е., Рубин О.Д., Камнев Н.М. Экспериментальное обоснование узла распределителя к напорному водоводу здания ГЭС гидроузла Аль Вахда // Гидротехническое строительство. – 1998. – № 6. – С. 52-56.
5. Рубин О.Д., Лисичкин С.Е., Фролов К.Е. Результаты экспериментальных исследований железобетонных конструкций

Б2, Б5 (Этап 1), Б3 (Этап 2), Б3 (Этап 3), Б4 (Этап 4), Б5 (Этап 2).

2. Проведенный комплекс экспериментальных исследований указывает на эффективность усиления малоармированных железобетонных конструкций гидротехнических сооружений с межблочными строительными швами, находящихся в стадии длительной эксплуатации посредством применения предварительно напряженной продольной базальтокомпозитной арматуры и поперечной арматуры.

3. Необходимо отметить, что размещение предварительно напряженной базальтокомпозитной арматуры в сжатой зоне конструкций требует контроля с точки зрения возможного перенапряжения бетона сжатой зоны, что проверяется проведением комплекса соответствующих расчетов.

4. Дальнейшие исследования могут быть направлены на проведение экспериментов с моделями подпорных стен, усиленных двухрядной предварительно напряженной базальтокомпозитной арматурой, параллельной тыловой грани малоармированных конструкций с межблочными строительными швами.

### References

1. Bekker A.T., Umansky A.M. Primenenie balzatoplastikovej armatury v konstruktsiyah morskikh gidrotehnicheskikh sooruzhenij // Izvestiya Vserossijskogo nauchno-issledovatel'skogo instituta idrotehniki im. B.E. Vedeneeva. – 2016. – № 282. – S. 61-75.
2. Rubin O.D., Umnova R.V. Experimentalnye issledovaniya zhelezobetonnyh konstruktsij pri dejstvii izgibayushchih momentov, prodolnyh i poperechnykh sil // Sb. nauchnykh trudov Hidroproyekta. – 1991. – Vyp. 145. – S. 83-95.
3. Rubin O.D., Zaharov I.B., Lisichkin S.E. Otsenka sostoyaniya avtodorozhnogo mosta Pavlovskoj GES i raschetno-eksperimentalnoe obosnovanie meropriyatij po ego usileniyu // Energeticheskoe stroitelstvo. – 1994. – № 9. – S. 47-50.
4. Lisichkin S.E., Rubin O.D., Kamnev N.M. Experimentalnoe obosnovanie uzla raspredelatelya k napornomu vodovodu zdaniya GES gidrouzla Al Vahda // Hidrotehnicheskoe stroitelstvo. – 1998. – № 6. – S. 52-56.
5. Rubin O.D., Lisichkin S.E., Frolov K.E. Rezultaty experimentalnykh issledovaniy zhelezobetonnyh konstruktsij GTS, imeyushchih mezhblochnye stroitelnye shvy,

ГТС, имеющих межблочные строительные швы, усиленных внешним армированием из углеродного волокна // Вестник МГСУ. – 2018. – Т. 13. – Вып. 9. – С. 1067-1079.

6. **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.

7. Экспериментальные исследования потерь предварительного напряжения базальтокомпозитной арматуры в составе бетонного элемента / Е.Н. Беллендир, О.Д. Рубин, С.Е. Лисичкин и др. // Гидротехническое строительство. – 2020. – № 7. – С. 2-6.

8. **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.

9. **Зюзина О.В.** Экспериментальные исследования железобетонных конструкций гидротехнических сооружений, усиленных предварительно напряженной поперечной арматурой // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. – 2020. – № 6. – С. 504-512.

10. СП 63.13330.2012. Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения. Актуализированная редакция СНиП 52-01-2003. – М.: 2012. – 161 с. – URL: <https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4293801/4293801835.pdf>.

11. СП 295.1325800.2017. Конструкции бетонные, армированные полимерной композитной арматурой. Правила проектирования. – М.: Стандартинформ, 2017. – 55 с. – URL: <http://docs-api.cntd.ru/document/456096924>.

#### Критерии авторства:

Рубин О.Д., Лисичкин С.Е., Зюзина О.В. выполнили экспериментальные теоретические исследования, на основании которых провели обобщение и написали рукопись. Рубин О.Д., Лисичкин С.Е., Зюзина О.В. имеют на статью авторское право и несут ответственность за плагиат.

#### Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликтов интересов

Статья поступила в редакцию: 14.01.2021 г.

Одобрена после рецензирования 20.01.2021 г.

Принята к публикации 26.01.2021 г.

usilennyh vnesnim armirovaniem iz ugle-rodnogo volokna // Vestnik MGSU. – 2018. – t. 13. – Vyp. 9. – S. 1067-1079.

6. **Rubin O.D., Lisichkin S.E., Frolov K.E.** Experimentalnyh issledovaniy zhelezobetonnyh konstruksij gidrotehnicheskikh sooruzhenij s blochnymi shvami, usilennyh sistemoj vnesnego armirovaniya // Stroitel'naya mehanika inzhenernyh konstruksij i sooruzhenij. – 2018. – № 3. – S. 198-204

7. Experimentalnye issledovaniya poter predvaritelnogo napryazheniya bazaltokompozitnoj armatury v sostave betonno elementa / Bellendir E.N., Rubin O.D., Lisichkin S.E. i dr. // Gidrotehnicheskoe stroitel'stvo. – 2020. – № 7. – S. 2-6.

8. **Rubin O.D., Lisichkin S.E., Lisichkin S.E., Zyuzina O.V.** Vliyanie bazaltokompozitnoj predvaritelno napryazhennoj armatury na rabotu maloarmirovannyh, zhelezobetonnyh konstruksij s mezhblochnymi stroitel'nymi shvami // Prirodoobustrojstvo. – 2020. – № 5. – S. 50-58.

9. **Zyuzina O.V.** Experimentalnye issledovaniya zhelezobetonnyh konstruksij gidrotehnicheskikh sooruzhenij, usilennyh prdvaritelno napryazhennoj poperechnoj armaturoj / Stroitel'noj mehanika inzhenernyh sooruzhenij. – 2020. – № 6. – S. 504-512.

10. SP 63.13330.2012. Betonnye i zhelezobetonnye konstruksii. Osnovnye polozheniya. Aktualizatsiya redaktsiya SNiP 52-01-2003. – M. 2012. – 161 s. <https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4293801/4293801835.pdf>

11. SP 295.1325800.2017. Konstruksii betonnye, armirovannye polimernoj kompozitnoj armaturoj. Pravila proektirovaniya. – M.: Standartinform. – 2017. – 55 s. <http://docs-api.cntd.ru/document/456096924>

#### Criteria of authorship:

Rubin O.D., Lisichkin S. E., Zyuzina O.V. carried out experimental theoretical studies, on the basis of which they generalized and wrote the manuscript. Rubin O.D., Lisichkin S.E., Zyuzina O.V. have a copyright on the article and are responsible for plagiarism.

#### Conflict of interests

The authors state that there are no conflicts of interests

The article was submitted to the editorial office 14.01.2020

Approved after reviewing 20.01.2021

Accepted for publication 26.01.2021