

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

УДК 626/691.328:620.1

DOI: 10.22363/1815-5235-2019-15-3-237-242

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

## Экспериментальные исследования железобетонных конструкций гидротехнических сооружений, усиленных композитными материалами

К.Е. Фролов<sup>1</sup>

ПАО «РусГидро», Российская Федерация, 127006, Москва, ул. Малая Дмитровка, 7

*Ключевые слова:*

гидротехнические сооружения;  
железобетонные конструкции;  
углеродные ленты и ламели;  
экспериментальные исследования;  
изгибающий момент;  
контрольно-измерительная аппаратура

*Аннотация*

**Актуальность.** В процессе эксплуатации (в первую очередь при длительной эксплуатации) гидротехнических сооружений возникает необходимость усиления их железобетонных конструкций. В последние годы в промышленном и гражданском строительстве находит применение усиление железобетонных конструкций системами внешнего армирования из композитных материалов (например, углеродных). При этом в гидротехническом строительстве имеются только единичные примеры такого усиления.

**Цели.** Представленные в статье экспериментальные исследования железобетонных конструкций гидротехнических сооружений, усиленных внешним армированием из углеродных материалов, проводились в целях обоснования применения внешнего армирования на основе углеродных материалов (лент и ламелей) для усиления железобетонных конструкций гидротехнических сооружений.

**Методы.** Эксперименты по усилению гидротехнических сооружений внешним армированием из углеродных материалов осуществлялись с использованием специально изготовленных железобетонных моделей гидротехнических конструкций балочного типа. При этом для моделирования принимались железобетонные конструкции, имеющие характерные признаки гидротехнических сооружений, такие как невысокие классы бетона и проценты армирования (менее 1 %). Усиление железобетонных моделей выполнялось углеродными лентами и ламелями. Экспериментальные исследования проводились при действии изгибающего момента по стандартным методикам. Определялось повышение прочности железобетонных конструкций за счет их усиления углеродными лентами и ламелями.

**Результаты.** Получены данные о прочности железобетонных конструкций гидротехнических сооружений без усиления и усиленных углеродными лентами и ламелями при действии изгибающего момента. На основе проведенного сравнения определено повышение прочности железобетонных конструкций за счет их усиления углеродными лентами и ламелями.

*История статьи:*

Поступила в редакцию: 04 марта 2019 г.

Доработана: 12 мая 2019 г.

Принята к публикации: 12 июня 2019 г.

*Для цитирования*

Фролов К.Е. Экспериментальные исследования железобетонных конструкций гидротехнических сооружений, усиленных композитными материалами // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2019. Т. 15. № 3. С. 237–242. <http://dx.doi.org/10.22363/1815-5235-2019-15-3-237-242>

## Введение

В настоящее время находит применение усиление железобетонных конструкций промышленного и гражданского назначения внешним арми-

рованием из композитных материалов. Что касается практики отечественного гидротехнического строительства и эксплуатации гидротехнических сооружений, то имеются отдельные примеры использования такого усиления. Поэтому возникает необходимость обоснования применения усиления внешним армированием из углеродных материалов (лент и ламелей) для усиления железобетонных конструкций гидротехнических сооружений.

Железобетонные конструкции гидротехнических сооружений принципиально отличаются от

<sup>1</sup> Фролов Кирилл Евгеньевич, инженер, заместитель генерального директора по научно-проектной деятельности; соискатель ученой степени, кафедра гидротехнических сооружений, Институт мелиорации, водного хозяйства и строительства имени А.Н. Костякова, Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева, [frolovke@gidroogk.ru](mailto:frolovke@gidroogk.ru)

© Фролов К.Е., 2019



This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License

железобетонных конструкций промышленных и гражданских сооружений.

Для железобетонных конструкций гидротехнических сооружений характерны:

- значительные габариты, в том числе высота сечения конструкции более 1 м;
- невысокие классы бетона (В10–В25);
- невысокие классы рабочей арматуры (А-II, А-III, в последние годы находит применение арматура класса А500);
- невысокие проценты армирования (менее 1 %);
- большие диаметры арматуры (до 70 мм А-II, до 40 мм А-III);
- наличие межблочных строительных швов;
- особенности характера действия нагрузок (включая противодействие воды в раскрывшихся швах и трещинах).

Выполнен анализ отечественного и зарубежного опыта усиления железобетонных конструкций внешним армированием из углеродных материалов [1–7], показавший, что наиболее целесообразно усиливать железобетонные конструкции системами внешнего армирования из углеродных лент и ламелей.

## 1. Цель исследований

В целях экспериментального обоснования применения внешнего армирования из композитных материалов для усиления гидротехнических соору-

жений были проведены экспериментальные исследования прочности железобетонных конструкций гидротехнических сооружений, усиленных углеродными лентами и ламелями, при действии изгибающего момента.

## 2. Материалы и методы исследований

Для экспериментов на действие изгибающего момента были изготовлены железобетонные модели балочного типа длиной 215 см, высотой 30 см и шириной 15 см (рис. 1).

При этом создавались модели двух серий, отличающиеся армированием и классом бетона, присущих конструкциям гидротехнических сооружений.

Модели одной серии имели армирование 2 диаметра 10 мм класса А500С (процент армирования 0,39 %) и изготавливалась из бетона класса В15 (рис. 1, а).

Модели другой серии имели армирование 3 диаметра 12 мм класса А500С (процент армирования 0,83 %) и изготавливалась из бетона класса В25 (рис. 1, б).

В каждую серию входили: две балки-близнеца без усиления; две балки-близнеца, усиленные углеродными лентами; две балки-близнеца, усиленные углеродными ламелями. Таким образом, было изготовлено двенадцать железобетонных моделей балочного типа.

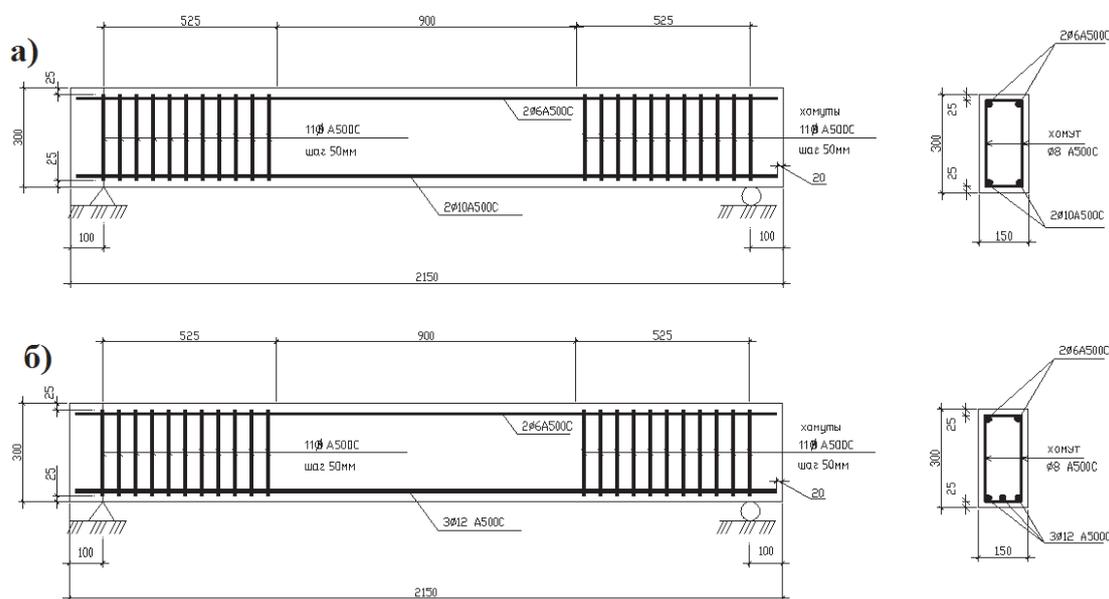
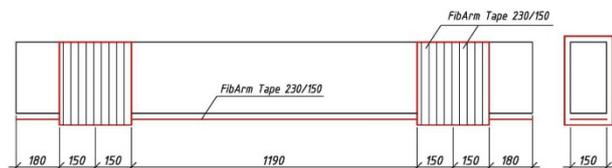


Рис. 1. Конструкция железобетонных моделей  
[Figure 1. The reinforced concrete models construction]

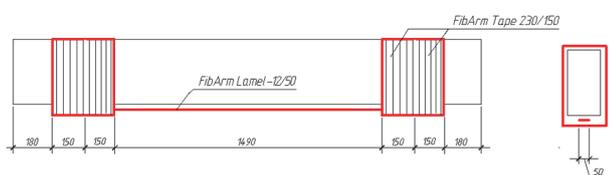
Для усиления железобетонных моделей использовались углеродные ленты типа FibArm Tape 230/300 толщиной 0,128 мм и углеродные ламели типа

FibArm Lamel 12/50. Ширина ленты принималась равной ширине моделей – 150 мм. Толщина ламелей принималась равной 1,2 мм, ширина – 50 мм.

Ленты наклеивались на нижней растянутой грани моделей в два слоя. Ламели также наклеивались на нижней растянутой грани модели. На опорных участках продольные углеродные ленты и ламели закреплялись замкнутыми хомутами из углеродной ленты FibArm Tape 230/300 шириной 300 мм (рис. 2 и 3).



**Рис. 2. Схема оклейки железобетонных моделей углеродными лентами**  
[Figure 2. The reinforced concrete models pasting with carbon tapes scheme]



**Рис. 3. Схема оклейки железобетонных моделей углеродными ламелями**  
[Figure 3. The reinforced concrete models pasting with carbon lamellas scheme]

В целях определения фактической прочности бетона моделей на сжатие и растяжение, а также модуля деформации одновременно с моделями бетонируются стандартные контрольные образцы: кубики размером  $100 \times 100 \times 100$  мм; призмы размером  $100 \times 100 \times 400$  мм и цилиндры диаметром 150 мм и высотой 150 мм.

Для проведения испытаний на действие изгибающего момента железобетонные модели длиной 2,15 м устанавливались на специальном стенде на двух опорах, расставленных на расстоянии 1,95 м друг от друга. Одна из опор – неподвижная, другая – катковая.

Для приложения вертикальной нагрузки применялся гидродомкрат, расположенный в центре пролета. Нагрузка передавалась на конструкцию через распределительную траверсу симметрично в двух точках на расстояниях 45 см от центра пролета и 52,5 см от опор (рис. 3).

В ходе испытаний железобетонных моделей опытная нагрузка прикладывалась ступенями, составляющими 10 % от разрушающей нагрузки. При достижении 80 % от разрушающей нагрузки прикладывалась более мелкими ступенями (по 5 % от нагрузки разрушения). После приложения соответствующей нагрузки на каждом этапе произ-

водилась выдержка, составляющая 15 мин, после этого регистрировались показания приборов.

Вид испытания железобетонных моделей представлен на рис. 4.



**Рис. 4. Испытание железобетонных моделей**  
[Figure 4. The reinforced concrete models testing]

Экспериментальные исследования проводились с учетом опыта исследований гидротехнических сооружений [8–13]. Результаты экспериментальных исследований железобетонных конструкций гидротехнических сооружений, имеющих межблочные строительные швы, проведенных с участием автора, представлены в [14].

### 3. Результаты исследований

В результате проведенных испытаний железобетонных моделей, в том числе усиленных углеродными лентами и ламелями, на действие изгибающего момента были получены следующие результаты.

Железобетонные модели-близнецы, изготовленные из бетона В15 с армированием 0,39 %, не имеющие усиления, разрушились при величине нагрузки 83,0 и 88,0 кН.

Железобетонные модели-близнецы, изготовленные из бетона В15 с армированием 0,39 %, усиленные углеродными лентами, разрушились при нагрузках 159,2 и 191,0 кН.

Железобетонные модели-близнецы, изготовленные из бетона В15 с армированием 0,39 %, усиленные углеродными ламелями, разрушились при нагрузках 161,1 и 160,0 кН.

Железобетонные модели-близнецы, изготовленные из бетона В25 с армированием 0,83 %, не имеющие усиления, разрушились при величине нагрузки 165,8 кН.

Железобетонные модели-близнецы, изготовленные из бетона В25 с армированием 0,83 %, уси-

ленные углеродными лентами, разрушились при нагрузках 232,0 и 257,0 кН.

Железобетонные модели-близнецы, изготовленные из бетона В25 с армированием 0,83 %, уси-

ленные углеродными ламелями, разрушились при нагрузках 250,6 и 238,7 кН.

Результаты проведенных экспериментальных исследований приведены в таблице.

Таблица

Результаты экспериментальных исследований железобетонных моделей, усиленных углеродными лентами и ламелями, при действии изгибающего момента  
[Table. The results of experimental studies of reinforced concrete models, strengthened with carbon ribbons and lamellae, under the action of bending moment]

№	Модель [Model]	Установка элементов усиления [Strengthening elements setting]	Прочность бетона на сжатие, МПа [Concrete compressive strength, MPa]	Разрушающая нагрузка, кН [Breaking load, kN]	$R_{\text{эксп}}, R_{\text{расч}}$ [ $R_{\text{oper}}, R_{\text{calc}}$ ]
<i>Бетон В15, армирование 2Ø10А500С [Concrete В15, reinforcement 2Ø10А500С]</i>					
1	Б-И15-1	Без усиления [Without amplification]	25,8	88,00	1,14
2	Б-И15-2		15,9	83,00	1,09
3	Б-И15-3	Усиление углеродной лентой [Carbon tape enforcement]	24,4	191,00	2,50
4	Б-И15-4		24,4	159,20	2,10
5	Б-И15-5	Усиление углеродной ламелью [Reinforced carbon lamella]	20,5	161,1	2,15
6	Б-И15-6		20,5	160,0	2,13
<i>Бетон В25, армирование 3Ø12А500С [Concrete В25, reinforcement 3Ø12А500С]</i>					
7	Б-И25-1	Без усиления [Without amplification]	29,5	165,80	1,03
8	Б-И25-6		36,5	165,80	1,03
9	Б-И25-4	Усиление углеродной лентой [Carbon tape enforcement]	39,7	257,00	1,57
10	Б-И25-5		24,3	232,00	1,42
11	Б-И25-2	Усиление углеродной ламелью [Reinforced carbon lamella]	37,4	250,6	1,53
12	Б-И25-3		37,4	238,7	1,46

Следовательно, за счет усиления углеродными лентами прочность железобетонных конструкций из бетона В15 с армированием 0,39 % повысилась в среднем в 2,3 раза; прочность железобетонных конструкций из бетона В25 с армированием 0,83 % – в 1,5 раза.

За счет усиления углеродными ламелями, прочность железобетонных конструкций из бетона В15 с армированием 0,39 % повысилась в среднем в 2,14 раза; прочность железобетонных конструкций из бетона В25 с армированием 0,83 % – в 1,5 раза.

В результате при меньшем армировании и классе бетона эффективность усиления железобетонных конструкций выше, что подтверждает актуальность данного метода усиления для гидротехнических сооружений.

#### Список литературы

1. Jian-he Xie, Ruo-lin Hu. Experimental study on rehabilitation of corrosion-damaged reinforced concrete beams with carbon fiber reinforced polymer // Construction and Building Materials. 2012. Vol. 38. Pp. 708–716.
2. Ehab Hamed, 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.

3. Yinzhi Zhou, Mingkang Gou, Fengyu Zhang, Shoujun Zhang, Dan Wang. 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.

4. Сердюк А.И., Чернявский В.Л. Опыт усиления строительных конструкций композиционными материалами при реконструкции Баксанской ГЭС // Гидротехника. 2013. № 3 (32). С. 115–117.

5. Козырев Д.В., Симохин А.С., Чернявский В.Л., Осмак П.П. Ремонт участков напорного коллектора композитными материалами // Монтажные и специальные работы в строительстве. № 9. 2009. С. 2–5.

6. Александров А.В., Рубин О.Д., Лисичкин С.Е., Балагуров В.Б. Расчетное обоснование и технические решения по усилению железобетонных конструкций ГЭС (ГАЭС), имеющих трещины различного направления, при действии комплекса нагрузок // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2014. № 6. С. 50–54.

7. Рубин О.Д., Лисичкин С.Е., Балагуров В.Б., Александров А.В. Новая технология ремонта ГЭС посредством армирования композитными материалами // Известия ВНИИГ. 2016. Т. 280. С. 3–10.

8. Лисичкин С.Е., Рубин О.Д., Ляпин О.Б., Нефедов А.В. Исследования бетонных и железобетонных энергетических сооружений // Гидротехническое строительство. 1999. № 8/9. С. 22–28.

9. Лисичкин С.Е., Рубин О.Д., Камнев Н.М. Экспериментальное обоснование узла распределителя к напор-

ному водоводу здания ГЭС гидроузла Аль Вахда // Гидротехническое строительство. 1998. № 6. С. 52–56.

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

11. Рубин О.Д., Лисичкин С.Е., Фролов К.Е. Результаты экспериментальных исследований железобетонных конструкций гидротехнических сооружений, усиленных углеродными лентами, при действии изгибающего момента // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2016. № 6. С. 58–63.

12. Рубин О.Д., Селезнев С.В. Экспериментальные исследования сборно-монолитных конструкций с бессварными стыками // Материалы конференций и совещаний по гидротехнике. Л.: Энергоатомиздат, 1987. С. 154–158

13. Рубин О.Д., Ляпин О.Б., Ни В.Е. Усиление эксплуатируемых подпорных сооружений // Гидротехническое строительство. 1989. № 12. С. 42–45.

14. 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.

RESEARCH PAPER

## Experimental studies of reinforced concrete structures of hydraulic structures strengthened with composite materials

Kirill E. Frolov<sup>1</sup>

RusHydro (Public Joint-Stock Company), 7 Malaya Dmitrovka St., Moscow, 127006, Russian Federation

### Keywords:

hydraulic structures;  
reinforced concrete structures;  
carbon tapes and lamellae;  
experimental studies;  
bending moment;  
instrumentation equipment

### Abstract

**Relevance.** During the operation process (first of all, long-term operation) of hydraulic structures, it becomes necessary to strengthen their reinforced concrete structures. In recent years, reinforcement of reinforced concrete structures has been used in industrial and civil construction by external reinforcement systems made of composite materials (for example, carbon materials). In this case, in hydraulic engineering construction there are only isolated examples of such amplification.

**Aims of research.** Experimental studies of reinforced concrete structures of hydraulic structures strengthened with external reinforcement from carbon materials presented in the article were carried out in order to substantiate the use of external reinforcement based on carbon materials (tapes and lamellae) to reinforce reinforced concrete structures of hydraulic structures.

**Methods.** In order to carry out an experimental study of the strengthening of hydraulic structures with external reinforcement, reinforced concrete models of hydraulic structures of a beam type were made of carbon materials. At the same time, reinforced concrete structures with characteristic features of hydraulic structures, such as low concrete classes and reinforcement percentages (less than 1%), were adopted for modeling. Reinforced concrete models were strengthened with carbon ribbons and lamellae. Experimental studies were carried out under the action of a bending moment using standard methods. The increase in the strength of reinforced concrete structures due to their reinforcement with carbon ribbons and lamellae was determined.

**Results.** The results of experimental studies of the strength of reinforced concrete structures of hydraulic structures without reinforcement and reinforced with carbon ribbons and lamellae under the action of a bending moment are presented. On the basis of the comparison carried out, the increase in the strength of reinforced concrete structures is determined by their reinforcement with carbon ribbons and lamellae.

### Article history:

Received: March 04, 2019

Revised: May 12, 2019

Accepted: June 12, 2019

### For citation

Frolov K.E. (2019). Experimental studies of reinforced concrete structures of hydraulic structures strengthened with composite materials. *Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings*, 15(3), 237–242. <http://dx.doi.org/10.22363/1815-5235-2019-15-3-237-242> (In Russ.)

## References

1. Jian-he Xie, Ruo-lin Hu. (2012). Experimental study on rehabilitation of corrosion-damaged reinforced concrete

beams with carbon fiber reinforced polymer. *Construction and Building Materials*, 38, 708–716.

2. Ehab Hamed, Bradford M.A. (2012). Flexural time-dependent cracking and post-cracking behaviour of FRP strengthened concrete beams. *International Journal of Solids and Structures*, 49, 1595–1607.

3. Yinzhi Zhou, Mingkang Gou, Fengyu Zhang, Shoujun Zhang, Dan Wang. (2013). Reinforced concrete beams strengthened with carbon fiber reinforced polymer by fric-

<sup>1</sup> Kirill E. Frolov, Engineer, Deputy General Director for Research and Development Activities; candidate for a scientific degree, Department of Hydrotechnical Structures, Institute of Amelioration, Water Management and Construction named after A.N. Kostyakov, Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy, frolovke@gidroogk.ru

tion hybrid bond technique: experimental investigation. *Materials and Design*, 50, 130–139.

4. Serdyuk A.I., Chernyavskiy V.L. (2013). Opyt usileniya stroitel'nykh konstruktsey kompozitsionnymi materialami pri rekonstruktsii Baksanskoy GES [The Experience in strengthening building structures with composite materials during the reconstruction of the Baksanskaya HPP]. *Gidrotekhnika [Hydrotechnika]*, (3–32), 115–117. (In Russ.)

5. Kozyrev D.V., Simokhin A.S., Chernyavskiy V.L., Os'mak P.P. (2009). Remont uchastkov napornogo kollektora kompozitnymi materialami [Repair of pressure collector areas with composite materials]. *Montazhnyye i spetsial'nyye raboty v stroitel'stve [Installation and special works in construction]*, (9), 2–5. (In Russ.)

6. Aleksandrov A.V., Rubin O.D., Lisichkin S.E., Balagurov V.B. (2014). Raschetnoye obosnovaniye i tekhnicheskkiye resheniya po usileniyu zhelezobetonnykh konstruktsey GES (GAES), imeyushchikh treshchiny razlichnogo napravleniya, pri deystvii kompleksa nagruzok [Estimated rationale and technical solutions for strengthening concrete structures of HPP (SPP) having cracks of different directions, under the influence of complex loads]. *Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings*, (6), 50–54. (In Russ.)

7. Rubin O.D., Lisichkin S.E., Balagurov V.B., Aleksandrov A.V. (2016). Novaya tekhnologiya remonta GTS posredstvom armirovaniya kompozitnymi materialami [New technology hydropower constructions repair through reinforcement with composite materials]. *Izvestiya VNIIG [Proceedings of the All-Russian Research Institute of Hydraulic Engineering]*, (280), 3–10. (In Russ.)

8. Lisichkin S.E., Rubin O.D., Lyapin O.B., Nefedov A.V. (1999). Issledovaniya betonnykh i zhelezobetonnykh energeticheskikh sooruzheniy [Research of concrete and reinforced concrete power structures]. *Gidrotekhnicheskoye stroitel'stvo [Power Technology and Engineering]*, (8/9), 22–28. (In Russ.)

9. Lisichkin S.E., Rubin O.D., Kamnev N.M. (1998). Eksperimental'noye obosnovaniye uzla raspredelitelya k napornomu vodovodu zdaniya GES gidrouzla Al' Vakhda

[Experimental substantiation of the distributor node to the pressure conduit of the building of the hydroelectric power station of the Al Wahda Dam]. *Gidrotekhnicheskoye stroitel'stvo [Power Technology and Engineering]*, (6), 52–56. (In Russ.)

10. Frolov K.E. (2017). Eksperimental'nyye issledovaniya zhelezobetonnykh konstruktsey gidrotekhnicheskikh sooruzheniy s sistemoy vneshnego armirovaniya uglerodnymi kompozitnymi lamelyami [Experimental research of reinforced concrete structures of hydrotechnical constructions with the system of external reinforcement by carbon composite lamels]. *Prirodoobustroystvo [Environmental engineering]*, (1), 56–61. (In Russ.)

11. Rubin O.D., Lisichkin S.E., Frolov K.E. (2016). Rezul'taty eksperimental'nykh issledovaniy zhelezobetonnykh konstruktsey gidrotekhnicheskikh sooruzheniy, usilennykh uglerodnymi lentami, pri deystvii izgibayushchego momenta [The results of experimental studies of concrete structures of hydraulic erections reinforced with carbon tape under the action of bending moments]. *Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings*, (6), 58–63. (In Russ.)

12. Rubin O.D., Seleznev S.V. (1987). Eksperimental'nyye issledovaniya sborno-monolitnykh konstruktsey s bes-svarnymi stykami. *Materialy konferentsiy i soveshchaniy po gidrotekhnike [Conference and meeting materials on hydraulic engineering]*, 154–158. (In Russ.)

13. Rubin O.D., Lyapin O.B., Ni V.E. (1989). Usileniye ekspluatiruyemykh podpornykh sooruzheniy [Strengthening of operational retaining structures]. *Gidrotekhnicheskoye stroitel'stvo [Power Technology and Engineering]*, (12), 42–45. (In Russ.)

14. Rubin O.D., Lisichkin S.E., Frolov K.E. (2018). Eksperimental'nyye issledovaniya zhelezobetonnykh konstruktsey gidrotekhnicheskikh sooruzheniy s blochnymi shvami, usilennykh sistemoy vneshnego armirovaniya [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*, 14(3), 198–204. (In Russ.)