

УДК 502/504:627.8:624.012.4

**К.Е. ФРОЛОВ**

Публичное акционерное общество «РусГидро», г. Москва

## **ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ ГИДРОТЕХНИЧЕСКИХ СООРУЖЕНИЙ С СИСТЕМОЙ ВНЕШНЕГО АРМИРОВАНИЯ УГЛЕРОДНЫМИ КОМПОЗИТНЫМИ ЛАМЕЛЯМИ**

*В целях обоснования применения технологии внешнего армирования на основе композитных материалов из углеродного волокна были проведены экспериментальные исследования напряженного состояния и прочности железобетонных конструкций, усиленных углеродными композитными ламелями. С учетом характерных особенностей массивного гидротехнического железобетона были изготовлены серии железобетонных моделей балочного типа без усиления и усиленные углеродными композитными ламелями. При этом элементы усиления (углеродные композитные ламели) наклеивались на нижнюю растянутую грань моделей. Для контроля за состоянием железобетонных моделей в ходе экспериментов устанавливалась контрольно-измерительная аппаратура. Экспериментальные исследования проводились на специально оборудованном силовом стенде на действие изгибающего момента. В ходе испытаний нагрузка прикладывалась ступенями по 10% от величины нагрузки разрушения моделей. В результате испытаний определялись нагрузки разрушения контрольных моделей без усиления и моделей, усиленных внешним армированием. При анализе полученных результатов определялось повышение прочности железобетонных конструкций, усиленных углеродными композитными ламелями, в сравнении с конструкциями без усиления. Таким образом, было получено повышение прочности железобетонных конструкций гидросооружений в 1,5-2 раза за счет применения углеродных композитных ламелей.*

*Гидротехнические сооружения; железобетонные конструкции, внешнее армирование, технология усиления, композитные материалы, углеродные композитные ламели, экспериментальные исследования, железобетонные модели, изгибающий момент.*

**Введение.** В настоящее время широкое применение находит технология усиления железобетонных конструкций системами внешнего армирования на основе композитных материалов из углеродного волокна [1-7]. Авторами предлагается выполнять усиление железобетонных конструкций гидротехнических сооружений системой внешнего армирования с использованием углеродных композитных ламелей.

В целях обоснования технологии усиления железобетонных конструкций гидротехнических сооружений проводились экспериментальные исследования на основе моделей характерных конструкций гидротехнических сооружений, усиленных углеродными композитными ламелями, при действии изгибающего момента с учетом опыта моделирования железобетонных конструкций гидросооружений [8-9].

**Материалы и методы.** Для моделирования были приняты характерные железобетонные конструкции гидротехнических сооружений, отличающиеся значительными габаритами, сравнительно не-

высокими классами бетона и процентами армирования.

Таким образом, были разработаны конструкции моделей балочного типа, имеющие длину 2,15 м, размеры поперечного сечения 30 x 15 см (рис. 1).

Армирование моделей принималось в виде 2-х диаметров 10 мм (процент армирования – 0,39%) и 3-х диаметров 12 мм (процент армирования – 0,83%) из арматуры класса А500С. Бетон моделей принимался, соответственно, классов В15 и В25.

Модели с одинаковыми параметрами изготавливались в двух экземплярах для подтверждения достоверности полученных результатов. В целях сопоставления изготавливались модели железобетонных конструкций без усиления и усиленные углеродными композитными ламелями.

Усиление моделей железобетонных конструкций выполнялось углеродными композитными ламелями типа FibArm-Lamel 120/50. Толщина ламелей принималась равной 1,2 мм, ширина – 50 мм. Ламели наклеивались на нижней растя-

нутой грани модели специальным двухкомпонентным клеем типа FibArmResinLaminate+. На участках моделей, расположенных за пределами зоны «чистого изгиба» у опор, продольные углеродные ламели закреплялись поперечными хомутами из углеродной ленты FibArmTape 230/300 шириной 300 мм, чтобы избежать преж-

временного отрыва ламелей от конструкции по контакту между бетоном и ламелью в средней части пролета (рис. 2). Нормативная прочность ламелей при растяжении равняется 2800 МПа, расчетная прочность в составе конструкции (с учетом клеевой прослойки, контакта с бетоном) составляет около 1250 МПа.

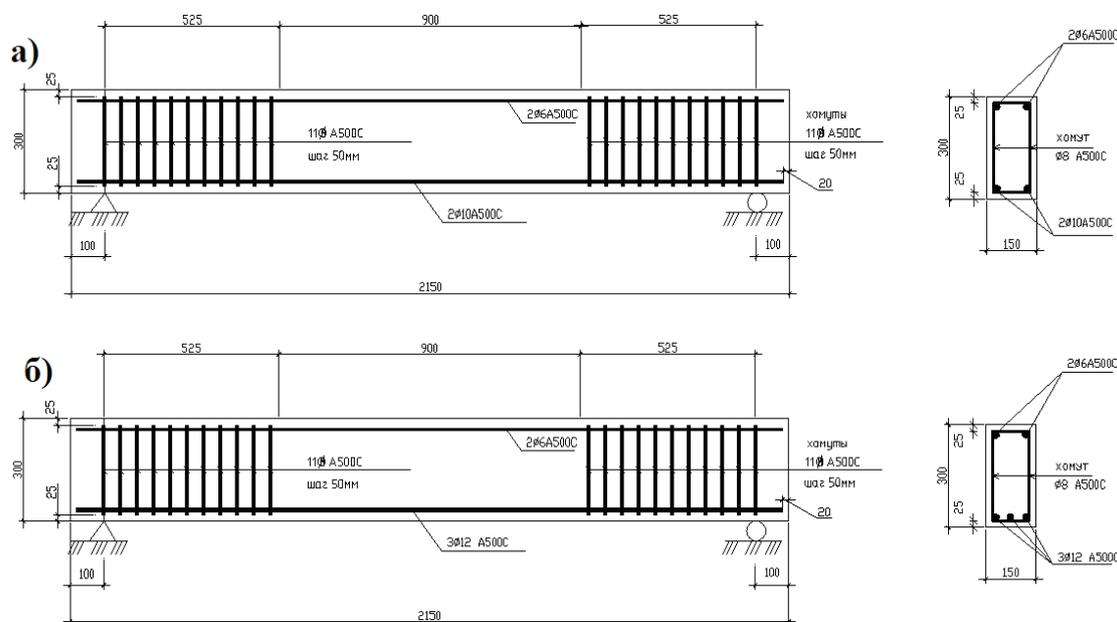


Рис. 1. Конструкция железобетонных моделей

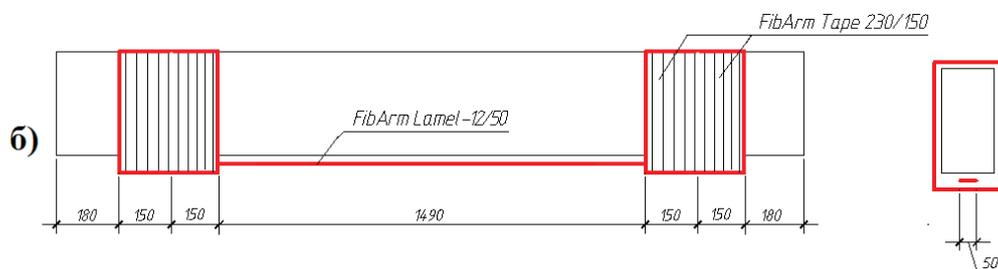


Рис. 2. Схема оклейки железобетонных моделей углеродными ламелями

Для определения фактических физико-механических характеристик бетона моделей (прочности на сжатие и на растяжение, модуля деформаций) из того же бетона, что и модели изготавливался набор стандартных контрольных образцов: кубиков размером 100 x 100 x 100 мм; призм размером 100 x 100 x 400 мм; цилиндров диаметром 150 мм и высотой 150 мм.

В целях наблюдений за величинами деформаций моделей в процессе экспериментов они оснащались контрольно-измерительной аппаратурой. В том числе для измерения величин прогибов моделей применялись индикаторы часового типа ИЧ-10 с ценой деления 0,01 мм. Индикаторы устанавливались на лицевой грани: на опорах

(И1 и И3) и в центре пролета (И2) – и на тыловой грани: на опорах (И4 и И6) и в центре пролета (И5) (рис. 3).

Относительные деформации элементов усиления – ламелей – измерялись посредством тензорезисторов с базой измерений 50 мм (рис. 3). При этом тензорезисторы наклеивались «цепочкой» на одной из симметричных половин зоны действия «чистого изгиба» (между двумя силами).

В ходе испытаний модели помещались внутрь силовой рамы и устанавливались на опоры (одна – подвижная, другая – неподвижная), воспроизводящие «свободное» опирание конструкции. При этом длина пролета составляла 1,95 м. Вертикальная нагрузка прикладывалась

гидродомкратом, расположенном в центре пролета, с передачей нагрузки на модель в двух точках на расстоянии 0,45 м от цен-

тра каждая посредством горизонтальной траверсы. Схема испытаний представлена на рисунке 3.

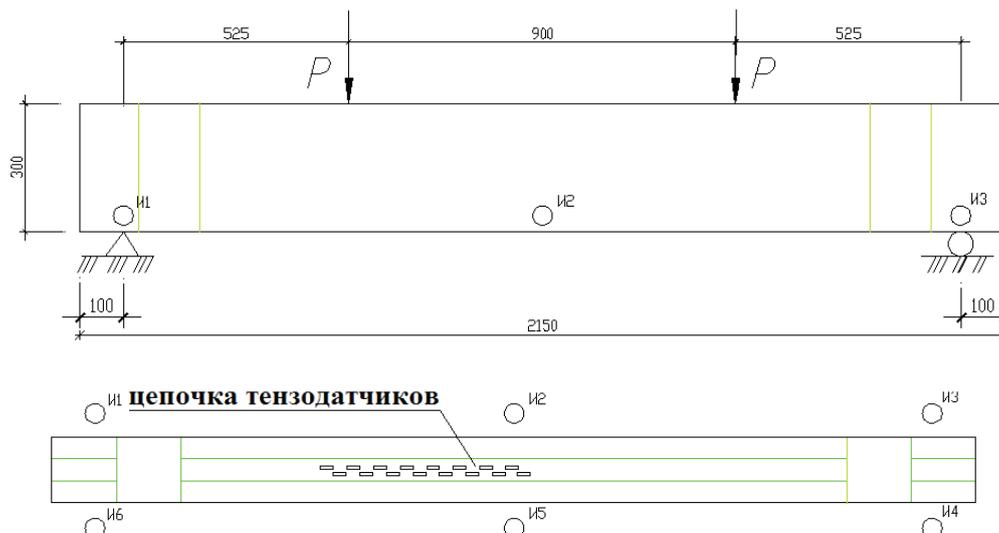


Рис. 3. Схемы испытаний и оснащения железобетонных моделей контрольно-измерительной аппаратурой

В соответствии с действующими нормами опытная нагрузка прикладывалась ступенями, составляющими 10% от разрушающей нагрузки. При этом на каждом этапе нагружения модель выдерживалась не менее 15 мин, после чего снимались показания приборов.

Трещинообразование в моделях регистрировалось посредством микроскопа отсчетного МПБ-2.

Разрушение железобетонных моделей без усиления принималось при наступле-

нии текучести в арматуре. Разрушение железобетонных моделей, усиленных углеродными ламелями, принималось при отрыве ламелей от бетона или при разрушении бетона сжатой зоны конструкции.

Следует упомянуть, что были проведены специальные исследования влияния водной среды на прочность бетонных образцов (призм и кубиков), усиленных углеродными ламелями, которые дали положительные результаты.



Рис. 4. Вид испытания железобетонной модели

**Результаты и обсуждение.** Полученные в ходе результаты эксперименталь-

ных исследований железобетонных моделей гидросооружений представлены в таблице.

**Результаты экспериментальных исследований железобетонных моделей гидросооружений, усиленных композитными материалами**

№ п/п	Наименование модели	Установка элементов усиления	Прочность бетона на сжатие, МПа	Разрушающая нагрузка, кН.м	$\frac{M_{\text{эксп.}}}{M_{\text{расч.}}}$
Бетон В15, армирование 2Ø10А500С					
1	Б-И15-1	Без усиления	25,80	46,20	1,14
2	Б-И15-2		15,90	43,58	1,09
3	Б-И15-5	Усиление углеродной ламелью	20,50	84,58	2,15
4	Б-И15-6		20,50	84,00	2,13
Бетон В25, армирование 3Ø12А500С					
5	Б-И25-1	Без усиления	29,50	87,05	1,03
6	Б-И25-6		36,50	87,05	1,03
7	Б-И25-2	Усиление углеродной ламелью	38,70	131,56	1,53
8	Б-И25-3		33,10	125,32	1,46

Как это следует из таблицы, разрушение железобетонных моделей, имеющих армирование 2 диаметра 10 мм и, соответственно, процент армирования 0,39%, изготовленных из бетона класса В15 без усиления, происходило при величине изгибающего момента 46,2 и 43,58 кН.м.

Железобетонные модели, имеющие армирование 2 диаметра 10 мм и, соответственно, процент армирования 0,39%, изготовленные из бетона класса В15, усиленные углеродными композитными ламелями, разрушились при величине изгибающего момента 84,58 и 84,0 кН.м.

Разрушение железобетонных моделей, имеющих армирование 3 диаметра 12 мм и, соответственно, процент армирования 0,83%, изготовленных из бетона класса В25 без усиления, происходило при величине изгибающего момента 87,05 кН.м.

Железобетонные модели, имеющие армирование 3 диаметра 12 мм и, соответственно, процент армирования 0,83%, усиленные углеродными композитными ламелями, изготовленные из бетона класса В25, разрушились при величине изгибающего момента 131,56 и 125,32 кН.м.

Расчетные значения разрушающей нагрузки для опытных балок определялись в соответствии с методикой действующих нормативных документов (СП 41.13330.2012 «Бетонные и железобетонные конструкции гидротехнических сооружений» Актуализированная редакция СНиП 2.06.08-87) при фактической величине прочности бетона для каждой балки (определяемой путем испытаний контрольных бетонных образ-

цов) и при напряжениях текучести в арматуре моделей.

Как следует из таблицы, отношение экспериментальных значений разрушающей нагрузки к расчетным значениям составило для моделей Б-И15-1 и Б-И15-2 (изготовленных без усиления) 1,14 и 1,09; для моделей Б-И15-5 и Б-И15-6 (усиленных углеродными композитными ламелями) – 2,15 и 2,13; для моделей Б-И25-1 и Б-И25-6 (изготовленных без усиления) – 1,03; для моделей Б-И25-2 и Б-И25-3 (усиленных углеродными композитными ламелями) – 1,53 и 1,46.

### Выводы

1. Для обоснования применения внешнего армирования углеродными композитными ламелями были разработаны (и далее изготовлены) модели характерных железобетонных конструкций гидротехнических конструкций из бетонов классов В15 и В25 с двумя вариантами армирования (2 диаметра 10 мм (0,39%) и 3 диаметра 12 мм (0,83%) класса А500С).

2. Железобетонные модели без усиления и усиленные углеродными композитными ламелями, оснащенные контрольно-измерительной аппаратурой, были испытаны на действие изгибающего момента. Выполнено сравнение опытных значений разрушающей нагрузки с расчетными значениями, определенными в рамках методики нормативных документов при фактических прочностных характеристиках бетона и арматуры моделей.

3. Проведенные экспериментальные исследования показали, что за счет усиления

ния углеродными композитными 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% повысилась в среднем в 1,5 раза.

4. Результаты экспериментальных исследований прочности железобетонных конструкций, усиленных углеродными композитными ламелями, показали целесообразность применения технологии внешнего армирования углеродными ламелями в гидротехническом строительстве.

#### Библиографический список

1. Jian-heXie, Ruo-linHu. Experimental study on rehabilitation of corrosion-damaged reinforced concrete beams with carbon fiber reinforced polymer // Construction and Building Materials. 38 (2012). P. 708-716.
2. EhabHamed, Mark A., Bradford. Flexural time-dependent cracking and post-cracking behaviour of FRP strengthened concrete beams // International Journal of Solids and Structures. 49 (2012) P. 1595-1607.
3. YinZhiZhou, 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. 50 (2013). P. 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. – 2009. – № 9. – 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. – № 8/9. – 1999. – С. 22-28.
9. 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.

Материал поступил в редакцию 29.09.2016 г.

#### Сведения об авторе

**Фролов Кирилл Евгеньевич**, заместитель генерального директора по научно-проектной деятельности, ПАО «РусГидро»; 127006, г. Москва, ул. Малая Дмитровка, д. 7; тел.: 8-800-333-80-00, доб. 1643; e-mail: FrolovKE@rushydro.ru

**K.E. FROLOV**

Public Joint-stock company «Rushydro», Moscow

## EXPERIMENTAL RESEARCH OF REINFORCED CONCRETE STRUCTURES OF HYDROTECHNICAL CONSTRUCTIONS WITH THE SYSTEM OF EXTERNAL REINFORCEMENT BY CARBON COMPOSITE LAMELS

*A way to strengthen concrete structures by additional external reinforcement using carbon fiber composites is spreading widely in recent years. In most cases this refers to civil engineering. Despite this fact there are only few examples of using an external reinforcement of composite materials for strengthening structures in hydraulic engineering. In order to justify the application of the technology of external reinforcement using composite materials based on carbon fiber several experimental researches of stress state and durability of reinforced concrete structures with carbon composite lamels were carried out recently. Taking into account the specific characteristics of massive hydraulic concrete structures, series of models of reinforced concrete beam were made with and without strengthening by carbon composite lamels. The reinforcing*

*elements (carbon composite lamels) were glued to the lower stretched surface of the models. Process-control instruments were used during the experiments in order to monitor the condition of strengthened concrete models. The experimental studies were done on a specially equipped test stand which explores the action of the bending moment. During the tests load was applied step-by-step with each step of 10% of the determined load need for destructing the models. As a result of the tests, load indicators of destructing the control models, with and without strengthening by the external reinforcement, were specified. During the analysis of the results obtained an increasing of durability of concrete structures with reinforcing by carbon fiber composites was determined, in comparison with the structures without reinforcement. Therefore, an increasing of durability of the reinforced concrete structures of hydrotechnical constructions in 1.5-2 times due was reached through the use of carbon composite lamels.*

*Hydrotechnical constructions; reinforced concrete structures; external reinforcement; reinforcement technology; composite materials; carbon composite lamel; experimental research; reinforced concrete model; bending moment.*

### References

1. Jian-heXie, Ruo-linHu. Experimental study on rehabilitation of corrosion-damaged reinforced concrete beams with carbon fiber reinforced polymer // Construction and Building Materials. 38 (2012). P. 708-716.
2. EhabHamed, Mark A., Bradford. Flexural time-dependent cracking and post-cracking behaviour of FRP strengthened concrete beams // International Journal of Solids and Structures. 49 (2012) P. 1595-1607.
3. YinzhiZhou, 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. 50 (2013). P. 130-139.
4. Serdyuk A.I., Chernyavsky V.L. Opyt usileniya stroitelnyh constructsij kompozitsionnymi materialami pri reconstructsii Baksanskoj GES // Gidrotehnika. – 2013. – № 3 (32). – S. 115-117.
5. Kozyrev D.V., Simohin A.S., Chernyavsky V.L., Osjmak P.P. Remont uchastkov v stroiteljstve. – 2009. – № 9. – S. 2-5.
6. Alexandrov A.V., Rubin O.D., Lisichkin S.E., Balagurov V.B. Raschetnoe obosnovanie I tehivheskie resheniya po usileniyu zhelezobetonnyh constructsij GES (GAES), imeyushchih treshchiny razlichnyh napravlenogo napravleniya, pri deistvii complexa nagruzok // Stroiteljnaya mehanika inzhenernyh constructsij i sooruzhenij. – 2014. – № 6. – S. 50-54.
7. Rubin O.D., Lisichkin S.E., Balagurov V.B., Alexandrov A.V. Novaya tehnologiya remonta GTS posredstvom armirovaniya kompozitnymi materialami // Izvestiya VNIIG, – 2016. – T. 280. – S. 3-10.
8. Lisichkin S.E., Rubin O.D., Lyapin O.B., Nefedov A.V. Issledovaniya betonnyh i zhelezobetonnyh energeticheskikh sooruzhenij // Gidrotehnicheskoe stroiteljstvo. – № 8/9. – 1999. – S. 22-28.
9. Lisichkin S.E., Rubin O.D., Kamnev N.M. Experimentalnoe obosnovanie uzla raspredelitelya k napornomu vodovodu zdaniya GES gidrouzla Alj Vakhda // Gidrotehnicheskoe stroiteljstvo. – 1998. – № 6. – S. 52-56.

The material; was received at the editorial office  
29.09.2016;

### Information about the author

**Frolov Kirill Yevgenjevich**, deputy general director on research – design activity. PAO «RusHydro»; 127006, Moscow, ul. Malaya Dmitrovka, d. 7; tel.: 8-800-333-80-00, ext. 1643; e-mail: FrolovKE@rushydro.ru