

**РАСЧЕТНОЕ ОБОСНОВАНИЕ И ТЕХНИЧЕСКИЕ РЕШЕНИЯ
ПО УСИЛЕНИЮ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ ГЭС (ГАЭС),
ИМЕЮЩИХ ТРЕЩИНЫ РАЗЛИЧНОГО НАПРАВЛЕНИЯ,
ПРИ ДЕЙСТВИИ КОМПЛЕКСА НАГРУЗОК**

А.В. АЛЕКСАНДРОВ*, инженер; О.Д. РУБИН**, д-р техн. наук
С.Е. ЛИСИЧКИН***, д-р техн. наук; В.Б. БАЛАГУРОВ**, инженер

* ОАО «Институт Гидропроект»

125993, г. Москва, Волоколамское шоссе, дом 2, a.aleksandrov@hydroproject.ru

** ОАО «Научно-исследовательский институт энергетических сооружений» (ОАО «НИИЭС»), 125362, г. Москва, Строительный проезд, д. 7А, info@niies.ru

*** ООО «Инженерный центр сооружений, конструкций и технологий в энергетике» (ООО «ИЦ СКТЭ»), 125362, г. Москва, ул. Свободы, д.35,

Гидротехнические сооружения при строительстве и эксплуатации могут подвергаться нештатным воздействиям (в том числе нештатным осадкам). При этом в железобетонных конструкциях возникает система трещин, характер которых соответствует особенностям комплекса действующих нагрузок. На примере здания ГЭС (ГАЭС) предлагается усиливать железобетонные конструкции гидросооружений системой внешнего армирования на основе углеродного волокна. На основе численного моделирования выполнено расчетное обоснование предложенных технических решений по усилению железобетонных конструкций гидросооружений.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: железобетонные конструкции ГЭС (ГАЭС), комплекс не-проектных нагрузок, характер трещинообразования, усиление железобетонных конструкций гидротехнических сооружений, технические решения по усилению, система внешнего армирования, углеродное волокно; расчетное обоснование; численное моделирование, конечно-элементные модели, напряженно-деформированное состояние.

В практике зарубежного и отечественного гидротехнического строительства имеются примеры ремонта и усиления железобетонных конструкций ГТС посредством системы внешнего армирования с применением материалов из углеродного волокна [1-5]. Так, например, имеются случаи усиления железобетонных опор мостов, массивных причальных балок, насосных станций, напорных водоводов и др.

В практике строительства и эксплуатации отечественных гидроузлов имеются примеры непроектной осадки ГТС. При этом происходит изменение расчетных схем, вследствие чего рабочее армирование, направленное в одном направлении (вдоль потока, поперек потока) или установленное у одной из граней конструкций (верхних, нижних, внутренних, наружных), становится второстепенным (недогруженным). С другой стороны, конструктивное армирование другого направления, являющееся второстепенным по проекту, в сложившейся ситуации воспринимает основную нагрузку.

Вследствие указанных выше обстоятельств, в арматуре второстепенного направления (по проекту) возникают значительные напряжения. Соответственно, трещины, пересекающие указанную арматуру, имеют значительную ширину раскрытия. При этом трещины одного из направлений (соответственно, напряжения в арматуре одного направления) образуются при действии нагрузок строительного или эксплуатационного случаев, предусмотренных проектом, а трещины другого направления (соответственно, напряжения в арматуре другого направления) образуются при действии комплекса нагрузок, вызванных непроектными воздействиями, к примеру, осадкой сооружения.

Сформировавшееся при непроектной осадке сооружения напряженно-деформированное состояние железобетонных конструкций может потребовать усиления конструкций, так как, либо напряжения в арматуре, либо ширина раскрытия трещин превышают предельно допустимые значения. При проведении мероприятий по выравниванию и восстановлению проектного положения может вновь неоднократно изменяться расчетная схема сооружения, что может вызвать дальнейшее увеличение напряжений и, соответственно, ширину раскрытия трещин.

В качестве примера можно привести характер трещинообразования и напряженное состояние арматуры железобетонных конструкций здания ГЭС (ГАЭС) при его непроектной осадке. Анализ картины трещинообразования в напорной стене здания ГЭС (ГАЭС) позволил определить действующие нагрузки на характерных участках конструкции (рис. 1а).

На одном из участков конструкции стены здания ГЭС (ГАЭС) трещины расположены вертикально (что соответствует действию изгибающего момента); на другом участке трещины расположены наклонно (что соответствует действию поперечной силы совместно с изгибающим моментом); на третьем участке траектории трещин из наклонных переходят в горизонтальное положение (что соответствует продолжению действия поперечной силы – в меньшей степени и возникновению вертикального растяжения – в большей степени).

Аналогичный характер имеет картина трещинообразования в перекрытиях здания ГЭС (ГАЭС) (рис. 1б). Таким образом, железобетонные конструкции при непроектной осадке сооружения могут подвергаться целому комплексу нагрузок, включающему: изгибающий момент (в том числе крутящий момент из

плоскости); поперечную силу (совместно с изгибающим моментом); растяжение (совместно с поперечной силой); сжатие (вызванное весом конструкций).

Натурные наблюдения за трещинообразованием и данные определения фактических напряжений в арматурных стержнях, пересекающих выявленные трещины, методом разгрузки [6], показали, что ширина раскрытия вертикальных трещин и напряжения в арматуре увеличиваются по мере удаления от фундаментной плиты вверх. Данное обстоятельство соответствует наличию сжатой зоны бетона в фундаментной плите и наиболее растянутой зоны в верхнем перекрытии здания ГЭС (ГАЭС) (при этом раскрытие трещин и напряжения в арматуре пола машзала занимают промежуточное положение).

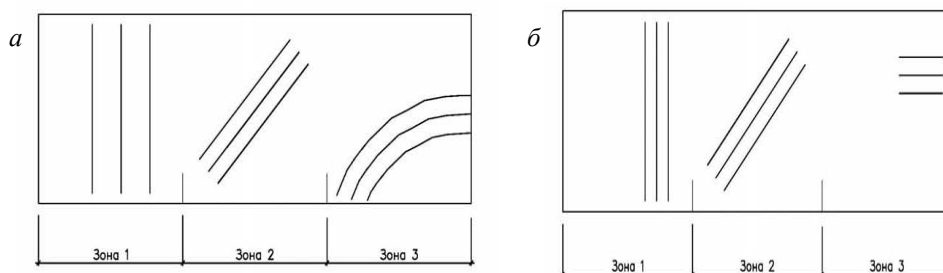
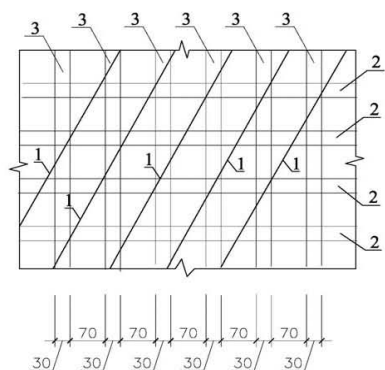


Рис. 1. Принципиальная схема трещинообразования в железобетонных конструкциях здания ГЭС при его непроектной осадке:

а) в напорной стене НБ (вид изнутри здания); б) в перекрытии здания ГЭС (вид сверху)

Напряженно-деформированное состояние железобетонных конструкций здания ГЭС (ГАЭС), сложившееся при его непроектной осадке, требует проведения мероприятий по усилению, учитывая, что напряжения и деформации, ожидаемые при действии эксплуатационных нагрузок, будут добавляться к возникшим в строительный период.



1- наклонные трещины, 2- ленты 3 слоя, 3- ленты 2 слоя

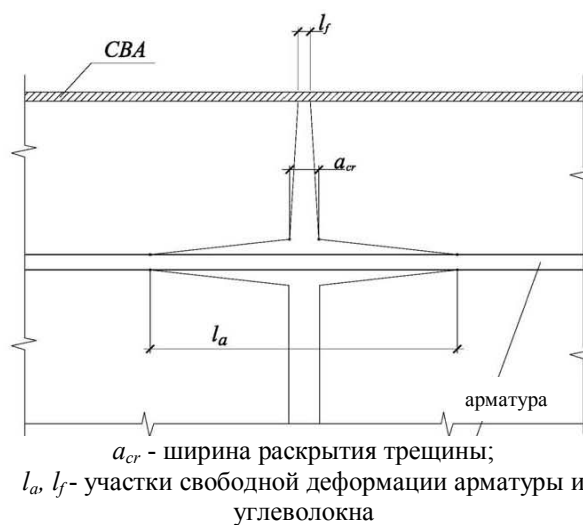
Рис. 2. Схема усиления участка железобетонного перекрытия здания ГЭС (ГАЭС) лентами из углеродного волокна (размеры даны в см)

Для усиления железобетонных конструкций было предложено использование системы внешнего армирования на основе углеродного волокна (углеродных лент типа FibArm 230/300). В том числе учитывались современные разработки, касающиеся безопасности гидросооружений [7]. Схема усиления участка перекрытия здания ГЭС (ГАЭС) лентами из углеродного волокна приведена на рис. 2.

Было выполнено расчетное обоснование предложенных решений по усилению железобетонных конструкций здания ГЭС (ГАЭС) посредством системы внешнего армирования на основе лент из углеродного волокна. При этом были учтены: напряженно-

деформированное состояние, сформировавшееся в конструкциях до усиления (в том числе трещинообразование, напряжения в арматуре и бетоне); совместная работа элементов усиления и арматуры железобетонных конструкций. Расчетные исследования НДС и прочности проводились в рамках методики численного моделирования гидротехнических сооружений [8, 9, 10], усовершенствованной авторами, в том числе в части учета системы усиления конструкций. Элементы внешнего армирования непосредственно включались в конечно-элементные модели железобетонных конструкций.

Особое внимание уделялось моделированию особенностей контакта арматурных стержней и углеродных лент с бетоном, в том числе нарушению сцепления с бетоном в зонах трещин (рис. 3). При этом учитывался опыт исследований контакта металлических и других материалов с бетоном [11, 12]. Анализ результатов расчетов показал, что при наступлении развитой текучести в арматурных стержнях (500 МПа) напряжения в элементах усиления (лентах из углеродных волокон) достигают своих расчетных значений (3570 МПа).



a_{cr} - ширина раскрытия трещины;
 l_a , l_f - участки свободной деформации арматуры и углеволокна

Рис. 3. Характерное развитие трещины на участке свободной деформации арматуры и углеволокна

Л и т е р а т у р а

1. Чернявский В.Л. Система ремонта и усиления строительных конструкций // Гидротехника. – 2010-2011. – №№ 4 (21) -5 (22). – С. 60-63.
2. Сердюк А.И., Чернявский В.Л. Опыт усиления строительных конструкций композиционными материалами при реконструкции Баксанской ГЭС // Гидротехника. -- 2013. – № 3 (32). – С. 115-117.
3. Ehab Hamed, 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.
4. 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. 50 (2013), p. 130-139.
5. 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. 38 (2012), p. 708–716.
6. Егоров Л.В., Захаров Э.В., Белохин С.Л., Николаев В.Б. Руководящий документ эксплуатирующей организации РД ЭО 1.1.2.99.0867-2012 Методика оценки технического состояния и остаточного ресурса строительных конструкций атомных станций. ОАО «Концерн Росэнергоатом», М., 2013, 57 с.
7. Снежко В.Л. Использование геоинформационных систем для получения оценок надежности технического состояния сооружений низконапорных гидроузлов // Естественные и технические науки. - 2010. – №6. – С. 654-658.
8. Рубин О.Д., Лисичкин С.Е., 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., Ляпин О.Б. Совершенствование железобетонных конструкций энергетических сооружений // Гидротехническое строительство. – 1999. – №8/9. – С.71-75.
10. Шестопалов П.В. Расчетные исследования для уточнения физико- механических характеристик скального основания на основе данных натурных наблюдений // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. –2013.–№1.–С. 66-72.
11. Румянцева И.А. Экспериментальные исследования работы разных видов выштамповок на сдвиг // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. – 2014. – № 5. – С. 74 – 79.
12. А.с. 1557289. 5E04C5/03. Арматура для бетона. / Э.Л. Айрумян, Беляев В.Ф., Румянцева И.А., Росляков В.Ф., Кузнецов Н.А., Голованов С.Б., Алексеев В.А. // БИ. 1990. №14. – С. 160.

References

1. Chernjavskij VL (2010, 2011). Sistema remonta i usilenija stroitel'nyh konstrukcij. *Gidrotehnika*. № 4 (21) - № 5 (22), p. 60-63.
2. Serdjuk AI, Chernjavskij VL (2013). Opyt usilenija stroitel'nyh konstrukcij kompozicionnymi materialami pri rekonstrukcii Baksanskoj GJeS. *Gidrotehnika*, № 3 (32), p. 115-117.
3. Ehab Hamed, Mark A. Bradford (2012). Flexural time-dependent cracking and post-cracking behaviour of FRP strengthened concrete beams. *International Journal of Solids and Structures*, 49, p. 1595–1607.
4. Yinzhi Zhou, Mingkang Gou, Fengyu Zhang, Shoujun Zhang, Dan Wang (2013). Reinforced concrete beams strengthened with carbon fiber reinforced polymer by friction hybrid bond technique: Experimental investigation. *Materials and Design*, 50, p. 130-139.
5. 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, p. 708–716.
6. Egorov LV, Zaharov JeV, Belohin SL, Nikolaev VB (2013). Rukovodjashhij dokument jekspluatirujushhej organizacii RD JeO 1.1.2.99.0867-2012 Metodika ocenki tehničeskogo sostojanija i ostatochnogo resursa stroitel'nyh konstrukcij atomnyh stancij. *OAO «Koncern Rosjenergoatom»*, M., 57 p.
7. Snezhko VL (2010). Ispol'zovanie geoinformacionnyh sistem dlja poluchenija ocenok nadezhnosti tehničeskogo sostojanija sooruzhenij nizkonapornyh gidrouzlov. *Estestvennye i tehničeskije nauki*, № 6, p. 654-658.
8. Rubin OD, Lisichkin SE, Ljapin OB, Nefedov AV (1999). Issledovanija betonnyh i zhelezobetonnyh jenergetičeskijh sooruzhenij. *Gidrotehničeskoe stroitel'stvo*, №8/9, p. 22-28.
9. Lisichkin SE, Rubin OD, Ljapin OB (1999). Sovershenstvovanie zhelezobetonnyh konstrukcij jenergetičeskijh sooruzhenij. *Gidrotehničeskoe stroitel'stvo*, №8/9, p.71-75.
10. Shestopalov PV (2013). Raschetnye issledovanija dlja utochnenija fiziko-mehaniceskijh harakteristik skal'nogo osnovanija na osnove dannyh naturnyh nabljudenij. *Stroitel'naja mehanika inženernykh konstrukcij i sooruzhenij*. №1, p. 66-72.
11. Rumjanceva IA (2014). Jeksperimental'nye issledovanija raboty raznyh vidov vyshtampovok na sdvig. *Stroitel'naja mehanika inženernykh konstrukcij i sooruzhenij*, № 5, p. 74 – 79.
12. A.s. 1557289. 5E04S5/03. Armatura dlja betona. *Je.L. Ajrumjan, Beljaev VF, Rumjanceva IA, Rosljakov VF, Kuznecov NA, Golovanov SB, Alekseev VA. BI. 1990*, №14, p. 160.

ESTIMATED RATIONALE AND TECHNICAL SOLUTIONS FOR STRENGTHENING CONCRETE STRUCTURES OF HPP (PSPP) HAVING CRACKS OF DIFFERENT DIRECTIONS, UNDER THE INFLUENCE OF COMPLEX LOADS

A.V. Aleksandrov*, O.D. Rubin**, S.E. Lisichkin***, V.B. Balagurov**

**Institut "Hidroproekt", Moscow*

***Scientific Research Institute of Energy Structures (Open Joint-stock Company), Moscow*

****Engineering Center of Structures, Constructions and Technologies in Energy (Limited Liability Company), Moscow*

Hydrotechnical facilities during construction and operation may be subject to non-project impacts (including non-project subsidence). At the same time, in the reinforced concrete constructions a system of cracks occurs, the nature of which corresponds to the complex features of the acting loads. On an example of the HPP (PSPP) building are encouraged to strengthen concrete structures of hydraulic system of external reinforcement on the basis of carbon fiber. Based on numerical simulations computational justification of proposed technical solutions to strengthen concrete structures of hydraulic structures is performed.

KEYWORDS: reinforced concrete structures, complex non-project loads, the nature of the cracking, strengthening of reinforced concrete structures of hydraulic structures, technical solutions to strengthen, the reinforcement system, carbon fiber, design rationale, numerical simulation, finite-element models, stress-strain state.