



УДК 626.01

DOI 10.22363/2312-8143-2017-18-1-20-28

МЕТОДИКА РАСЧЕТА НА ПРОЧНОСТЬ НОРМАЛЬНЫХ СЕЧЕНИЙ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ ГИДРОТЕХНИЧЕСКИХ СООРУЖЕНИЙ, УСИЛЕННЫХ ВНЕШНИМ АРМИРОВАНИЕМ НА ОСНОВЕ УГЛЕРОДНЫХ МАТЕРИАЛОВ

О.Д. Рубин¹, С.Е. Лисичкин², К.Е. Фролов³

¹ АО «Научно-исследовательский институт энергетических сооружений»
Строительный проезд, д. 7А, Москва, Россия, 125362

² ООО «Инженерный центр сооружений, конструкций и технологий в энергетике»
ул. Свободы, д. 35, Москва, Россия, 125362

³ ПАО «РусГидро»
ул. Малая Дмитровка, д. 7, Москва, Россия, 127006

В целях усиления железобетонных конструкций общестроительного назначения широко применяются композиционные материалы из углеродного волокна. Для обоснования решений по усилению железобетонных конструкций гидротехнических сооружений внешним армированием из углеродного волокна потребовалась разработка методики расчета прочности усиленных конструкций. Были учтены характерные особенности массивных железобетонных конструкций гидросооружений и действующих на них нагрузок, в том числе противодействие воды в трещинах и раскрывшихся строительных швах. Разработаны зависимости для расчета прочности в нормальных сечениях изгибаемых железобетонных конструкций гидросооружений, усиленных внешним армированием из углеродного волокна.

Ключевые слова: гидротехнические сооружения, массивные железобетонные конструкции, внешнее армирование, композиционные материалы, нормальные сечения, изгибающий момент, прочность, строительные швы, противодействие воды

В настоящее время широкое применение находят композиционные материалы при усилении железобетонных конструкций общестроительного назначения [1–4].

При этом в гидротехническом строительстве отмечаются лишь отдельные случаи применения систем внешнего армирования (СВА) в качестве элементов усиления железобетонных конструкций. Следует отметить, что вышесказанное в большей степени относится к зарубежной практике [5–7].

При проектировании усиления железобетонных конструкций гидросооружений (ГТС) необходимо проводить расчетное обоснование проектных решений. В связи с этим возникает необходимость в разработке методики расчета прочности железобетонных конструкций ГТС, усиленных СВА на основе углеродных материалов.

При этом необходимо учитывать характерные особенности массивных железобетонных конструкций ГТС, а также особенности характера действия нагрузок.

К характерным особенностям железобетонных конструкций ГТС относятся:

- массивность (значительные габариты);
- применяемые бетон и арматура, как правило, невысоких классов прочности (бетон В10-В30), арматура (А-II, А-III), в последнее время нашла применение арматура А500С;

- невысокие проценты армирования (менее 1%);
- наличие межблочных строительных швов;
- особый характер трещинообразования (в том числе наличие магистральных трещин);
- наличие водной среды.

К особенностям характера действующих нагрузок относятся:

- гидравлическая нагрузка;
- необходимость учета противодействия в трещинах и раскрывшихся строительных швах;
- возможные знакопеременные нагрузки.

Авторами была разработана методика расчета прочности железобетонных конструкций ГТС, усиленных СВА на основе углеродных материалов, при действии изгибающего момента.

При разработке данной методики за основу были приняты нормативные документы по расчетам и проектированию железобетонных конструкций ГТС:

П-46-89 «Пособие по проектированию бетонных и железобетонных конструкций гидротехнических сооружений (без предварительного напряжения)» к СНиП 2.06.08-87;

СП 41.13330.2012. Актуализированная редакция СНиП 2.06.08-87 «Бетонные и железобетонные конструкции гидротехнических сооружений»;

СТО 17330282.27.140.002-2008. Гидротехнические сооружения ГЭС и ГАЭС. Условия создания. Нормы и требования. Приложения. Книга 3. Приложение Г, РАО «ЕЭС России».

Расчетная схема для нормального сечения балочной конструкции прямоугольного сечения, совпадающего с нормальной (вертикальной) трещиной или раскрывшимся вертикальным строительным швом, представлена на рис. 1.

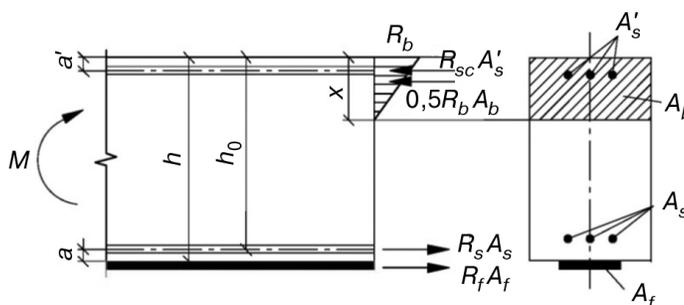


Рис. 1. Схема действия внешних и внутренних усилий в нормальном сечении усиленной железобетонной конструкции
 [Scheme of action for external and internal forces in the normal section of the strengthened reinforced concrete structure]

В соответствии с разработанной методикой условие прочности железобетонной конструкции ГТС, усиленной СВА из углеродного волокна, в нормальном сечении при действии изгибающего момента имеет вид

$$M \leq M_{ult}, \quad (1)$$

где M — изгибающий момент от внешних усилий; M_{ult} — суммарный изгибающий момент от внутренних усилий относительно центра тяжести сжатой зоны бетона.

Схема действия внешних и внутренних усилий в нормальном сечении показана на рис. 1. Схема действия противодействия воды в нормальной трещине или в раскрывшемся вертикальном строительном шве представлена на рис. 2.

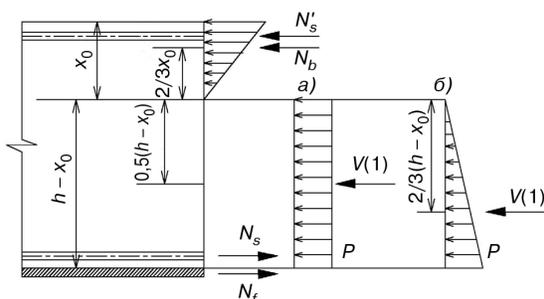


Рис. 2. Схема действия противодействия воды в нормальной трещине или в раскрывшемся вертикальном строительном шве: а) прямоугольная эпюра противодействия воды; б) треугольная эпюра противодействия воды
[Scheme of the counter pressure action of water in a normal crack or in a disclosed vertical construction joint: a) a rectangular diagram of water counter pressure; b) a triangular diagram of water counter pressure]

Уравнение равновесия сил в нормальном сечении в предельном состоянии материалов имеет вид

$$N_b + N'_s + V = N_s + N_f, \quad (2)$$

где N_b — продольная сжимающая сила в бетоне сжатой зоны; N'_s — продольное усилие в сжатой арматуре; V — равнодействующая противодействия воды в вертикальной трещине или вертикальном строительном шве; N_s — продольное усилие в растянутой арматуре; N_f — продольное усилие в растянутом элементе усиления.

Результаты проведенных экспериментальных исследований железобетонных балочных конструкций, усиленных элементами из углеродных материалов [8], показали, что продольные деформации в бетоне сжатой зоны конструкций распределяются по треугольному закону (рис. 3).

В связи с этим в рамках разработанной методики принималась треугольная форма эпюры сжимающих напряжений в бетоне сжатой зоны.

В таком случае продольное сжимающее усилие в бетоне сжатой зоны определяется по зависимости

$$N_b = 0,5R_b \cdot b \cdot x_0, \quad (3)$$

где R_b — расчетное сопротивление бетона сжатию;

$$N'_s = A'_s R_{sc}, \quad (4)$$

где A'_s — площадь сечения сжатой арматуры; R_{sc} — расчетное сопротивление арматуры сжатию.

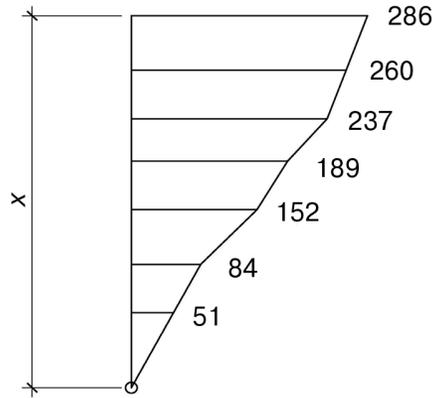


Рис. 3. Эпюра относительных продольных деформаций в бетоне сжатой зоны усиленной железобетонной конструкции ($\times 10^{-6}$)
 [Diagram of the relative longitudinal deformations in concrete of the compressed zone of a strengthened reinforced concrete structure ($\times 10^{-6}$)]

В соответствии с основными положениями разработанной методики учитывается воздействие противодавления воды P в раскрывшихся трещинах и контактных строительных швах (см. рис. 2).

В случае прямоугольной формы эпюры противодавления воды равнодействующая равна

$$V = p \cdot (h - x_0), \quad (5)$$

в случае треугольной формы эпюры противодавления воды —

$$V = 0,5p \cdot (h - x_0), \quad (6)$$

усилие в растянутой арматуре определяется из зависимости

$$N_s = A_s \cdot R_s, \quad (7)$$

где A_s — площадь сечения растянутой арматуры; R_s — расчетное сопротивление арматуры растяжению.

Усилие в растянутом элементе усиления определяется из зависимости

$$N_f = A_f \cdot R_f, \quad (8)$$

где A_f — площадь сечения элемента усиления на нижней растянутой грани; R_f — расчетное сопротивление растяжению композитного материала элемента усиления.

Значение суммарного изгибающего момента M_{ult} от внутренних усилий относительно центра тяжести бетона сжатой зоны определяется по формуле

$$M_{ult} = M_s + M_f \pm M'_s - M_v, \quad (9)$$

где M_s — момент от действия усилия в растянутой арматуре; M_f — момент от действия усилия в растянутом элементе усиления; M'_s — момент от действия усилия в сжатой арматуре (принимается со знаком «плюс» — в случае $a' > x_0/3$; со знаком «минус» — в случае $a' < x_0/3$); M_v — момент от действия равнодействующей противодействия;

$$M_s = N_s \left(h_0 - \frac{x_0}{3} \right), \quad (10)$$

$$M_f = N_f \left(h - \frac{x_0}{3} \right), \quad (11)$$

$$M'_s = \pm N'_s \left[\frac{x_0}{3} - a' \right], \quad (12)$$

$$M_v = N_v \left(0,5h + \frac{x_0}{6} \right), \quad (13)$$

в случае прямоугольной эпюры противодействия;

$$M_v = N_v \frac{2h}{3}, \quad (14)$$

в случае треугольной эпюры противодействия воды в трещине (строительном шве).

Учитывая треугольный характер распределения продольных напряжений в бетоне сжатой зоны, высоту сжатой зоны x_0 в железобетонной конструкции до усиления без учета противодействия определяют из зависимости

$$x_0 = -n\mu h_0 \pm \sqrt{(n\mu h_0)^2 + 2n\mu h_0^2}, \quad (15)$$

где $n = E_s/E_b$; μ — коэффициент армирования конструкции, равный A_s/bh_0 .

В железобетонной конструкции, усиленной СВА, высота сжатой зоны определяется на основе решения уравнения (2) и равняется:

в случае прямоугольной эпюры противодействия в трещине или в вертикальном строительном шве:

$$x_0 = \frac{R_s A_s + R_f A_f - R_{sc} A'_s - pbh}{(0,5R_b b - pb)}, \quad (16)$$

в случае треугольной эпюры противодавления в трещине или в вертикальном строительном шве:

$$x_0 = \frac{R_s A_s + R_f A_f - R_{sc} A'_s - 0,5pbh}{0,5(R_b b - pb)}. \quad (17)$$

Величина расчетного сопротивления композитного материала R_f определяется в соответствии с методикой, изложенной в СТО НИИЭС 002-2016 «Гидротехнические сооружения. Усиление железобетонных конструкций системой внешнего армирования из композитных материалов на основе углеродных волокон».

При определении фактического (не предельного) состояния железобетонной конструкции ГТС, усиленной СВА из композитного материала, в зависимостях (3), (4), (7), (8), (9) вместо расчетных сопротивлений R_b , R_s , R_{sc} , R_f следует принимать значения напряжений σ_b , σ_s , σ'_s , σ_f , которые определяются на основе гипотезы плоских сечений из соответствующих пропорций:

$$\sigma'_s = n\sigma_b \frac{x_0 - a'}{x_0}, \quad (18)$$

$$\sigma_f = \frac{\sigma_s(h - x_0)E_f}{(h_0 - x_0)E_s} \quad (19)$$

для случая усиления конструкции перед началом ее нагружения;

$$\sigma_f = \frac{(\sigma_s - \sigma_0)(h - x_0)E_f}{(h_0 - x_0)E_s} \quad (20)$$

для случая усиления конструкции под нагрузкой при напряжении σ_0 в стальной арматуре.

Неизвестные величины σ_b и σ_s определяются из совместного решения уравнений равновесия (1), (2) и (9).

Выводы. При разработке методики расчета прочности учитывались характерные особенности массивных железобетонных конструкций ГТС, а также особенности характера действия нагрузок (в том числе противодавление воды в трещинах и раскрывшихся строительных швах).

На основе экспериментальных данных о распределении продольных деформаций в сжатой зоне усиленной железобетонной конструкции принималась треугольная эпюра продольных напряжений в сжатой зоне.

Разработаны зависимости для расчета на прочность нормальных сечений изгибаемых железобетонных конструкций ГТС, усиленных внешним армированием из углеродных материалов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- [1] *Чернявский В.Л.* Система ремонта и усиления строительных конструкций // Гидротехника. 2010—2011. № 4(21)—5(22). С. 60—63.
- [2] *Рубин О.Д., Лисичкин С.Е., Балагуров В.Б., Александров А.В.* Новая технология ремонта ГТС посредством армирования композитными материалами // Изв. ВНИИГ. Т. 280. 2016. С. 3—10.
- [3] *Sandeep S. Pendhari, Tarun Kant, Yogesh, M. Desai.* Application of polymer composites in civil construction: A general review // Composite Structures № 84. 2008. Pp. 114—124.
- [4] *Einde L.V.D., Zhao L., Seible F.* Use of FRP composites in civil structural application // Constr. Build Mater., № 17. 2003. Pp. 389 M.R. 403.
- [5] *Duell J.M., Wilson J.M., Kessler M.R.* Analysis of a carbon composite overwrap pipeline repair system // International Journal of Pressure Vessels and Piping 85(2008). Pp. 782—789.
- [6] *Mohitpour M., Golshan H., Murray A.* Pipeline design and construction: a practical approach. // ASME Press; New York, 2003. Pp. 499—518.
- [7] *Сердюк А.И., Чернявский В.Л.* Опыт усиления строительных конструкций композиционными материалами при реконструкции Баксанской ГЭС // Гидротехника. № 3(32). 2013. С. 115—117.
- [8] *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. № 6. 2016. С. 58—63.

История статьи:

Дата поступления в редакцию: 11 декабря 2016

Дата принятия к печати: 20 января 2017

Для цитирования:

Рубин О.Д., Лисичкин С.Е., Фролов К.Е. Методика расчета на прочность нормальных сечений железобетонных конструкций гидротехнических сооружений, усиленных внешним армированием на основе углеродных материалов // *Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования*. 2017. Т. 18. № 1. С. 20—28.

Сведения об авторах:

Рубин Олег Дмитриевич, доктор технических наук, зам. генерального директора АО «НИИ энергетических сооружений» (АО «НИИЭС»). *Сфера научных интересов*: конструкции энергетических сооружений; безопасность сооружений, теории массивного железобетона, усиление железобетона композиционными материалами, напряженно-деформирование состояние, прочность, трещинообразование. *Контактная информация*: e-mail: cskte@mail.ru.

Лисичкин Сергей Евгеньевич, доктор технических наук, зам. генерального директора ООО «Инженерный центр сооружений, конструкций, технологий в энергетике» (ООО «ИЦ СКТЭ»). *Сфера научных интересов*: конструкции энергетических сооружений, безопасность сооружений; мониторинг состояния энергообъектов; теория массивного железобетона; усиление железобетона композиционными материалами; напряженно-деформирование состояние; прочность; трещинообразование. *Контактная информация*: e-mail: cskte@mail.ru.

Фролов Кирилл Евгеньевич, заместитель генерального директора ПАО «РусГидро» по научно-проектной деятельности; (ПАО «РусГидро»). *Сфера научных интересов*: энергетика, гидротехническое строительство, наука и проектирование, усиление железобетонных

конструкций гидросооружений внешним армированием из композиционных материалов, напряженно-деформированное состояние и прочность. *Контактная информация*: e-mail: FrolovKE@rushydro.ru.

METHODOLOGY FOR STRENGTH ANALYSIS OF NORMAL CROSS-SECTIONS OF REINFORCED CONCRETE HYDRAULIC STRUCTURES STRENGTHENED WITH CARBON COMPOSITE MATERIALS

O.D. Rubin¹, S.E. Lisichkin², K.E. Frolov³

¹ Scientific Research Institute of Energy Structures (Open Joint-stock Company)
Stroitel'nyj proezd, 7A, Moscow, Russia, 125362

² Engineering Center of Structures, Constructions and Technologies in Energy
(Limited Liability Company)
Svobody str., 35, Moscow, Russia, 125362

³ RusHydro
Malaya Dmitrovka str., 7, Moscow, Russia, 127006

The way to strengthen concrete structures in civil engineering by adding external reinforcement using carbon fiber composites is widely spreading in recent years. A method for calculating the strength of reinforced concrete in hydro technical constructions with reinforcing by carbon fiber composite materials was invented with the aim to justify the solutions of strengthening concrete structures. It was taken into consideration that the characteristic features of mass reinforced concrete structure with sand operating loads which including backpressure of water in the cracks and in opened construction joints. It has evolved the relations for calculation of strength in normal cross section of bending reinforced concrete member of hydro technical constructions which strengthening with external reinforcement by carbon fiber.

Key words: hydro technical constructions, mass reinforced concrete structures, external reinforcement, composite materials, normal cross section, bending moment, tensile strength, construction joints, back pressure of water

REFERENCES

- [1] Chernjavskij V.L. Sistema remonta i usileniya stroitel'nyh konstrukcij [System of repair and strengthening of building constructions]. *Gidrotehnika* [Hydraulic engineering]. 2010–2011. № 4 (21)–5(22). S. 60–63.
- [2] Rubin O.D., Lisichkin S.E., Balagurov V.B, Aleksandrov A.V. Novaya tekhnologiya remonta GTS posredstvom armirovaniya kompozitnymi materialami [The New technology of repair of hydrotechnical constructions strengthened by composite materials]. *Izv. VNIIG*. T. 280. 2016. Pp. 3–10.
- [3] Sandeep S. Pendhari, Tarun Kant, Yogesh M. Desai. Application of polymer composites in civil construction: A general review. *Composite Structures* № 84. 2008. Pp. 114–124.
- [4] Einde, L.V.D., Zhao, L., Seible, F. Use of FRP composites in civil structural application. *Constr. Build Mater.* № 17. 2003. Pp. 389–403.
- [5] Duell, J.M., Wilson, J.M., Kessler, M.R. Analysis of a carbon composite overwrap pipeline repair system. *International Journal of Pressure Vessels and Piping* 85 (2008). Pp. 782–789.

- [6] Mohitpour, M., Golshan, H., Murray, A. Pipeline design and construction: a practical approach. ASME Press; New York. 2003. Pp. 499—518.
- [7] Serdjuk A.I., Chernjavskij V.L. Opyt usilenija stroitel'nyh konstrukcij kompozicionnymi materialami pri rekonstrukcii Baksanskoj GJeS [Experience of building structures reinforcement composite materials in the reconstruction of the Baksanskaya HPP]. Gidrotehnika [Hydraulic engineering]. 2013. № 3 (32). Pp. 115—117.
- [8] Rubin O.D., Lisichkin S.E., Frolov K.E. Rezul'taty jeksperimental'nyh issledovanij zhelezobetonnyh konstrukcij gidrotehnicheskikh sooruzhenij, usilennyh uglerodnymi lentami, pri dejstvii izgibajushhego momenta [The Results of experimental studies of reinforced concrete structures hydraulic structures strengthened by carbon lamellas under the effect of bending moment]. Stroitel'naja mehanika inzhenernyh konstrukcij i sooruzhenij [Structural mechanics of engineering constructions and buildings]. № 6. 2016. Pp. 58—63.

Article history:

Received: 11 December 2016

Accepted: 20 January 2017

For citation:

Rubin O.D., Lisichkin S.E., Frolov K.E. (2017) Methodology for strength analysis of normal cross-sections of reinforced concrete hydraulic structures strengthened with carbon composite materials. RUDN Journal of Engineering Researches, 18(1), 20—28.

Bio Note:

Oleg D. Rubin, Doctor of Technical Sciences, Deputy General Director of JSC “Research Institute of Energy Facilities” (JSC “NIIES”). *Research Interests*: structures of energy facilities; safety of structures, theory of massive reinforced concrete, strengthening of reinforced concrete with composite materials, stress-strain state, strength, crack formation. *Contact information*: e-mail: cskte@mail.ru.

Sergey E. Lisichkin, Doctor of Technical Sciences, Deputy General Director of LLC “Engineering Center of Facilities, Structures, Technology in Energy Systems” (LLC “IC SCTE”). *Research Interests*: structures of energy facilities, safety of structures; energy facilities monitoring; theory of massive reinforced concrete; strengthening of reinforced concrete with composite materials; stress-strain state; strength; crack formation. *Contact information*: e-mail: cskte@mail.ru.

Kirill E. Frolov, Deputy General Director of OJSC “RusHydro” for research and design activities; (OJSC “RusHydro”). *Research Interests*: energy engineering, hydraulic engineering, science and design, strengthening of reinforced concrete hydraulic structures with composite materials, stress-strain state and strength. *Contact information*: e-mail: cskte@mail.ru.