

## МЕТОДИКА РАСЧЕТА ПРОЧНОСТИ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ ГИДРОТЕХНИЧЕСКИХ СООРУЖЕНИЙ, УСИЛЕННЫХ КОМПОЗИЦИОННЫМИ МАТЕРИАЛАМИ

О.Д. РУБИН\*, доктор технических наук,

С.Е. ЛИСИЧКИН\*\*, доктор технических наук,

К.Е. ФРОЛОВ\*\*\*, инженер,

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

\*\*ООО «Инженерный центр сооружений, конструкций и технологий в энергетике» (ООО«ИЦСКТЭ»), 125362, г. Москва, ул. Свободы, д.35, cskte@mail.ru

\*\*\*ПАО «РусГидро», 127006, г. Москва, ул. Малая Дмитровка, д.7,

FrolovKE@rushydro.ru

*Наиболее эффективным способом усиления железобетонных конструкций гидротехнических сооружений (ГТС) является внешнее армирование композиционными материалами на основе углеродных волокон. Разработана методика расчета прочности железобетонных конструкций гидротехнических сооружений, усиленных внешним армированием из композиционных материалов. В основу разработанной методики положены нормативные документы по проектированию железобетонных конструкций гидротехнических сооружений; учтены характерные особенности конструкций гидротехнических сооружений и результаты проведенных экспериментальных исследований.*

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** усиление железобетонных конструкций гидротехнических сооружений; внешнее армирование; композиционные материалы на основе углеродного волокна; особенности железобетонных конструкций ГТС; методика расчета прочности; несущая способность; изгибаемые элементы.

Анализ отечественного и зарубежного опыта [1-4] показал, что наиболее эффективным способом усиления железобетонных конструкций длительно эксплуатируемых гидротехнических сооружений (ГТС) является усиление внешним армированием из композиционных материалов на основе углеродных волокон.

К особенностям железобетонных конструкций ГТС относятся:

а) массивность (значительные геометрические размеры);  
б) применяется бетон и арматура не высоких классов: бетон В15÷В30, арматура класса А-I, А-II и А-III (в последнее время применяется арматура класса А500С);

в) низкие коэффициенты армирования  $\mu_s < 0,01$ ;

г) наличие межблочных строительных швов;

д) особый характер трещинообразования в массивных конструкциях ГТС;

е) наличие водной среды.

Особенности характерных нагрузок на ГТС:

а) гидравлические нагрузки;

б) противодавление воды в трещинах и в раскрывшихся межблочных строительных швах;

в) знакопеременные нагрузки и др.

Учитывая вышеуказанные особенности железобетонных конструкций ГТС и действующих на них нагрузок, были проведены экспериментальные исследования железобетонных конструкций ГТС, усиленных внешним армированием, при действии изгибающего момента [5].

Следует отметить, что разработанные ранее методики расчета прочности железобетонных конструкций, усиленных внешним армированием из композиционных материалов, разрабатывались применительно к конструкциям обще-

строительного назначения, существенно отличающихся от конструкций ГТС [6,7,8]. При этом за основу принимались соответствующие нормативные документы СП 52-101-2003 «Бетонные и железобетонные конструкции без предварительного напряжения арматуры», которые не распространяются на расчеты конструкций ГТС.

Основываясь на нормативных требованиях СП 41.13330.2012 «Бетонные и железобетонные конструкции гидротехнических сооружений» (Актуализированная редакция СНиП 2.06.08-87) [9] с учетом результатов проведенных экспериментальных исследований, разработана методика расчета прочности железобетонных конструкций гидротехнических сооружений, усиленных внешним армированием из композиционных материалов.

При расчете железобетонных конструкций гидротехнических сооружений следует учитывать несущую способность усиливаемой конструкции.

Расчет железобетонной конструкции, усиленной внешним армированием из полимерных композитов, следует производить с учетом начального напряженно-деформированного состояния конструкции перед ее усилением; которое определяется при действии фактических значений нагрузок без учета коэффициентов надежности по нагрузке.

Основные положения методики расчета прочности изгибаемых элементов железобетонных конструкций ГТС, усиленных внешним армированием из композиционных материалов по нормальным сечениям следующие.

1. Расчетное значение сопротивления растяжению материала внешнего армирования следует принимать равным:

$$R_{fu} = E_f \varepsilon_{fu} , \quad (1)$$

где:  $E_f$  – модуль упругости материала внешнего армирования;  $\varepsilon_{fu}$  – предельные расчетные деформации композита, определяются по формуле:

$$\varepsilon_{fu} = k_m \varepsilon_{ft} , \quad (2)$$

где  $k_m$  – коэффициент условия работы материала внешнего армирования, зависящий от жесткости элемента усиления:

$$\text{при } nE_{ft}t_f \leq 180000 \quad k_m = \frac{1}{60\varepsilon_{ft}} \left( 1 - \frac{nE_{ft}t_f}{360000} \right) \leq 0,9, \quad (3)$$

$$\text{при } nE_{ft}t_f > 180000 \quad k_m = \frac{1}{60\varepsilon_{ft}} \left( \frac{90000}{nE_{ft}t_f} \right) \leq 0,9, \quad (4)$$

где  $n$  – число слоёв материала внешнего армирования (ленты, сетки или ламели);  $t_f$  – безразмерный параметр, численно равный значению толщины одного слоя материала (ленты, сетки или ламели) в мм;

Расчетная деформация растяжения:

$$\varepsilon_{ft} = \frac{R_{ft}}{E_f}. \quad (5)$$

Расчетная прочность на растяжение материала внешнего армирования с учётом коэффициентов надежности условия работы  $C_E$  определяется из выражения:

$$R_{ft} = \frac{C_E}{\gamma_f} R_f. \quad (6)$$

Коэффициенты условий работы  $C_E$  для внешнего армирования принимаются в зависимости от условий окружающей среды по таблице 1.

Т а б л и ц а 1 – Коэффициенты условий работы  $C_E$  полимерного композита

Условия эксплуатации конструкции	Значение коэффициента $C_E$	
	Для ламелей	Для полимерных композитов, армированных лентами, холстами, тканями
Во внутренних помещениях	0,95	0,9
На открытом воздухе	0,85	0,8
При контакте с водой	0,765	0,72

Значения коэффициента надежности  $\gamma_f$  для предельных состояний первой группы принимаются равными:

- для однонаправленных углеродных тканей – 1,2;
- для двунаправленных углеродных тканей – 1,8.

При расчете по предельным состояниям второй группы коэффициент надежности принимается равным 1,0.

2. Предельные усилия в усиленном сечении, нормальном к продольной оси элемента, следует принимать исходя из следующих предпосылок:

- сопротивление бетона растяжению принимается равным нулю;
- сопротивление бетона сжатию представляется напряжениями, равными  $R_b$  и равномерно распределенными по сжатой зоне бетона;
- деформации (напряжения) в арматуре определяются в зависимости от высоты сжатой зоны бетона;
- растягивающие (сжимающие) напряжения в арматуре принимают не более расчетного сопротивления растяжению  $R_s$  (сжатию  $R_{sc}$ );
- деформации сдвига в клеевом слое не учитываются;
- при расчете усиленной конструкции с учетом существующей стальной арматуры должно выполняться условие:

$$R_f \leq (\varepsilon_{s2} - \varepsilon_s^0) \cdot E_f, \quad (7)$$

где  $\varepsilon_{s2}$  – предельное значение относительной деформации стальной арматуры, принимаемое равным 0,025 – для арматуры с физическим пределом текучести и 0,015 – для арматуры с условным пределом текучести;  $\varepsilon_s^0$  – начальное значение относительной деформации существующей стальной арматуры конструкции, определяемое с учетом наличия трещин в растянутой зоне конструкции.

3. Расчет по прочности нормальных сечений следует производить в зависимости от соотношения между значением относительной высоты сжатой зоны бетона  $\xi = x/h_0$  определяемой из соответствующих условий равновесия, и значением граничной относительной высоты сжатой зоны  $\xi_{Rf}$ , при котором предельное состояние элемента наступает одновременно с достижением в полимерном композите значения напряжения, равного расчетному значению сопротивлению  $R_f$ .

4. Значение  $\xi_{Rf}$  следует определять по формуле:

$$\xi_{Rf} = \frac{x_{Rf}}{h} = \frac{\omega}{1 + \frac{\varepsilon_{fu} + \varepsilon_b^0}{\varepsilon_{b2}}}, \quad (8)$$

где  $\omega$  – характеристика сжатой зоны бетона, принимаемая для тяжелого бетона равной 0,8;  $\varepsilon_{fu}$  – расчетное значение предельных относительных деформаций, вычисляемое по формуле:

$$\varepsilon_{f,u} = \frac{R_f}{E_f}, \quad (9)$$

$\varepsilon_{b2}$  – относительные деформации сжатого бетона при напряжениях  $R_b$ ;  $\varepsilon_b^0$  – значение относительной деформации сжатой грани бетона до усиления конструкции.

5. При учете начального напряженно-деформированного состояния изгибаемых элементов, сформировавшегося в них до усиления, в формулах (7) и (8) значения начальной относительной деформации существующей стальной арматуры  $\varepsilon_s^0$  и начальной относительной деформации сжатого бетона  $\varepsilon_b^0$  допускается определять по формулам:

$$\varepsilon_s^0 = \frac{M_0}{E_{b1} \cdot I_{red}} (h_0 - x_0), \quad (10)$$

$$\varepsilon_b^0 = \frac{M_0}{E_{b1} \cdot I_{red}} x_0, \quad (11)$$

где  $M_0$  – изгибающий момент от фактической нагрузки, действующей на конструкцию до усиления, относительно оси, нормальной плоскости действия изгибающего момента и проходящей через центр тяжести приведенного поперечного сечения элемента;  $E_{b1}$  – модуль деформации сжатого бетона;  $I_{red}$  – момент инерции приведенного поперечного сечения относительно его центра тяжести;  $x_0$  – высота сжатой зоны бетона.

6. Расчет по прочности сечений изгибаемых элементов, усиленных внешним армированием из полимерных композитов, следует производить из условия:

$$\gamma_c \gamma_n M \leq \gamma_c M_{ult}, \quad (12)$$

где  $\gamma_c$  – коэффициент сочетания нагрузок, принимаемый:

при расчетах по первой группе предельных состояний:

- для основного сочетания нагрузок и воздействий в период нормальной эксплуатации – 1,00;

- то же, для периода строительства и ремонта – 0,95;

для особого сочетания нагрузок и воздействий:

- при особой нагрузке, в том числе сейсмической на уровне проектного землетрясения годовой вероятностью 0,01 и менее – 0,95;

- при особой нагрузке, кроме сейсмической, годовой вероятностью 0,001 и менее – 0,9;

- при сейсмической нагрузке уровня максимального расчетного землетрясения – 0,85;

- при расчетах по второй группе предельных состояний – 1,00.

Коэффициент надежности по ответственности сооружения  $\gamma_n$ , принимается:

- при расчетах по предельным состояниям первой группы:

для класса сооружений:

- I – 1,25; - II – 1,20; - III – 1,15; - IV – 1,10;

- при расчетах по предельным состояниям второй группы – 1,00.

Коэффициент условий работы сооружения  $\gamma_c$ , принимается по строительным нормам и правилам на проектирование отдельных видов гидротехнических сооружений;  $M$  – изгибающий момент от внешней нагрузки;  $M_{ult}$  – предельный изгибающий момент, который может быть воспринят усиленным сечением элемента.

При расчете по прочности изгибаемых элементов рекомендуется соблюдать условие:  $x \leq \zeta_{Rf} h$ .

Расчетная схема для нормального сечения изгибаемого элемента представлена на рис. 1.

Значение  $M_{ult}$  для изгибаемых элементов прямоугольного сечения при

$\xi = \frac{x}{h} \leq \xi_{Rf}$  следует определять по формуле:

$$M_{ult} = \gamma_b R_b b x (h_0 - 0,5x) + \gamma_s R_{sc} A'_s (h_0 - a') + R_f A_f a, \quad (13)$$

где  $b$  и  $h$  – соответственно высота и ширина поперечного сечения элемента;

$h_0 = h - a$  – рабочая высота сечения;  $\gamma_b = \gamma_{b1}\gamma_{b2}\gamma_{b3}\gamma_{b4}\gamma_{b13}\gamma_{b14}\gamma_{b15}$  – коэффициент условий работы бетона;  $\gamma_s$  – коэффициент условий работы арматуры. При этом положение нейтральной оси определяется из условия:

$$\gamma_b R_b b x = \gamma_s R_s A_s - \gamma_s R_{sc} A'_s + R_f A_f, \quad (14)$$

где  $A_b$ ,  $A'_s$ ,  $A_s$ ,  $A_f$  – площади, соответственно, сжатой зоны бетона, поперечных сечений сжатой и растянутой стержневой арматуры и элемента усиления.

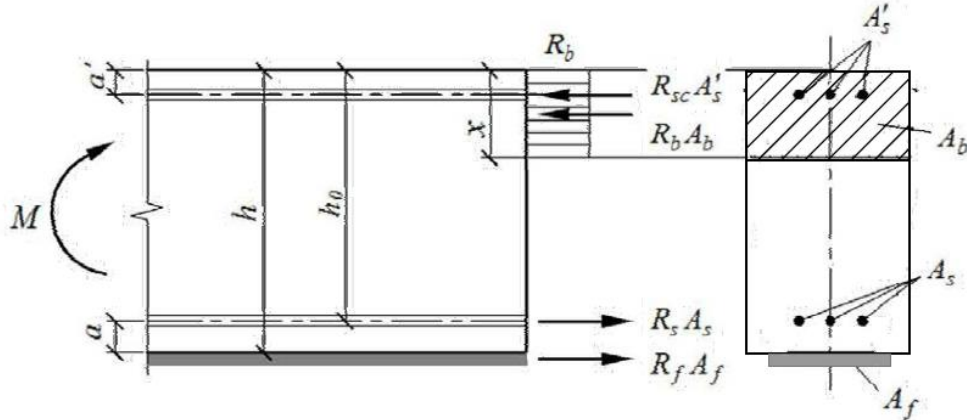


Рисунок 1 – Схема усилий и эпюра напряжений в сечении, нормальном к продольной оси изгибаемого железобетонного элемента с внешним армированием из полимерных композитов, при его расчете по прочности

7. При  $x > \xi_{Rf} h$  предельный изгибающий момент  $M_{ult}$  допускается определять по формулам:

$$M_{ult} = \gamma_b R_b b \bar{x} (h_0 - 0,5\bar{x}) + \gamma_s R_{sc} A'_s (h_0 - a') + \sigma_f A_f a, \quad (15)$$

где  $\sigma_f$  – напряжение во внешней арматуре из полимерного композита.

Напряжение  $\sigma_f$  определяется из зависимости:

$$\sigma_f = \sigma_s (h - x) E_f / (h_0 - x) E_s, \quad (16)$$

при усилении ненагруженной конструкции;

$$\sigma_f = (\sigma_s - \sigma_0) (h_0 - x) E_f / (h_0 - x) E_s, \quad (17)$$

при усилении конструкции под нагрузкой.

В формуле (15) значение  $\bar{x}$  следует принимать равным:

$$\text{– при } \xi_R \cdot h_0 > x > \xi_{Rf} \cdot h: \quad \bar{x} = \xi_{Rf} \cdot h;$$

$$\text{– при } x > \xi_R \cdot h_0: \quad \bar{x} = \xi_R \cdot h_0.$$

Граничные значения  $\xi_R$  надлежит принимать по таблице 2.

Т а б л и ц а 2 – Граничные значения высоты сжатой зоны

Класс арматуры	Граничные значения $\xi_R$ при классе бетона	
	В17,5 и ниже	от В20 до В30
А-I	0,70	0,65
А-II, А-III, А500С	0,65	0,60

Сопоставление расчетных значений изгибающего момента с экспериментальными данными приведено в таблице 3.

Т а б л и ц а 3

Наименование моделей	Расчетное значение изгибающего момента, кН.м	Опытное значение изгибающего момента, кН.м	Примечание
Б-И15-1	20,58	23,1	Без усиления
Б-И15-2	19,75	22,31	Без усиления
Б-И15-3	42,02	50,14	Усиление лентой
Б-И15-4	41,41	41,79	Усиление лентой
Б-И15-5	39,07	42,29	Усиление ламелью
Б-И15-6	39,15	42,0	Усиление ламелью
Б-И25-1	42,47	43,52	Без усиления
Б-И25-6	42,71	43,52	Без усиления
Б-И25-4	66,10	67,46	Усиление лентой
Б-И25-5	66,86	63,52	Усиление лентой
Б-И25-2	63,10	65,78	Усиление ламелью
Б-И25-3	62,12	62,66	Усиление ламелью

### Выводы

1. Впервые разработана методика расчета прочности железобетонных конструкций гидротехнических сооружений, усиленных внешним армированием из композиционных материалов на основе углеродного волокна.

2. Разработанная методика расчета прочности железобетонных конструкций гидротехнических сооружений, усиленных композиционными материалами, основывается на результатах проведенных экспериментальных исследований и на положениях норм проектирования железобетонных конструкций гидротехнических сооружений (СП 41.13330.2012 «Бетонные и железобетонные конструкции гидротехнических сооружений». Актуализированная редакция СНиП 2.06.08-87). При этом учитывались характерные особенности конструкций гидротехнических сооружений.

### 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. Шилин А.А., Пшеничный В.А., Картузов Д.В. Усиление железобетонных конструкций композитными материалами. – М., Стройиздат, 2004. – 144 с.

4. Sandeep S. Pendhari, Tarum Kant, Yogesh M. Desai. Application of polymer composites in civil construction: A general review// *Composite Structures*, 84 (2008), pp. 114-124.
5. 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.
6. Руководство по усилению железобетонных конструкций композитными материалами. ИнтерАква, НИИЖБ, М., 2006, 48 с.
7. Бокарев С.А., Смердов Д.Н., Неровных А.А. Методика расчета по прочности сечений эксплуатируемых железобетонных пролетных строений, усиленных композиционными материалами// *Известия ВУЗов. Строительство и архитектура*. – Новосибирск: Изд-во НГАСУ, 2010. – № 10. – С. 63-74
8. СТО 2256-002-2011. Система внешнего армирования из полимерных композитов FibARM для ремонта и усиления строительных конструкций. Общие требования. Технология усиления. ЗАО «Препрег-СКМ», М., 2012, 76 с.
9. СП 41.13330.2012 «Бетонные и железобетонные конструкции гидротехнических сооружений». Актуализированная редакция СНиП 2.06.08-87, М., 2012, 68 с.

#### References

1. Chernjavskij, V.L. (2010-2011). Sistema remonta i usilenija stroitel'nyh konstrukcij, *Gidrotehnika*, № 4 (21)-5 (22), pp. 60-63.
2. Serdjuk, A.I., Chernjavskij, V.L. (2013). Opyt usilenija stroitel'nyh konstrukcij kompozicionnymi materialami pri rekonstrukcii Baksanskoj GJeS, *Gidrotehnika*, № 3 (32), p. 115-117.
3. Shilin, A.A., Pshenichnyj, V.A., Kartuzov, D.V. (2004). *Usilenie Zhelezobetonnyh Konstrukcij Kompozitnymi Materialami*, М.: Strojizdat, 144 p.
4. Sandeep S. Pendhari, Tarum Kant, Yogesh M. Desai (2008). Application of polymer composites in civil construction: A general review, *Composite Structures*, 84, pp. 114-124.
5. Rubin, O.D., Lisichkin, S.E., Frolov, K.E. (2016). Rezul'taty jeksperimental'nyh issledovanij zhelezobetonnyh konstrukcij gidrotehnicheskikh sooruzhenij, usilennyh uglerodnymi lentami, pri dejstvii izgibajushhego momenta, *Stroitel'naja Mehanika Inzhenernyh Konstrukcij i Sooruzhenij*, № 6, pp. 58-63.
6. *Rukovodstvo po Usileniju Zhelezobetonnyh Konstrukcij Kompozitnymi Materialami*. Inter-Akva, NIIZhB, М., 2006, 48 s.
7. Bokarev, S.A., Smerdov, D.N., Nerovnyh, A.A. (2010). Metodika rascheta po prochnosti sechenij jekspluatiruemyh zhelezobetonnyh proletnyh stroenij, usilennyh kompozicionnymi materialami, *Izvestija VUZov. Stroitel'stvo i arhitektura*, Novosibirsk: Izd-vo NGASU, № 10, pp. 63-74.
8. СТО 2256-002-2011. Sistema vneshnego armirovanija iz polimernyh kompozitov FibARM dlja remonta i usilenija stroitel'nyh konstrukcij. Obshhie trebovanija. Tehnologija usilenija. ЗАО «Препрег-СКМ», М., 2012, 76 p.
9. СП 41.13330.2012 «Бетонные и железобетонные конструкции гидротехнических сооружений», Актуализированная редакция СНиП 2.06.08-87, М., 2012, 68 p.

#### METHODOLOGY FOR DURABILITY CALCULATION OF REINFORCED CONCRETE STRUCTURES OF HYDROTECHNICAL ERECTIONS STRENGTHENED BY COMPOSITE MATERIALS

O.D. Rubin, S.E. Lisichkin, K.E. Frolov

The most effective way of strengthening reinforced concrete hydrotechnical constructions is the external reinforcement by composite materials based on carbon fibers. A method for calculating the strength of reinforced concrete hydrotechnical erections with reinforcing by carbon fiber composite materials was innovated. The developed methodology is based on normative documents for design of reinforced concrete hydraulic structures, taking into account the design features of the hydraulic constructions and the results of the experimental studies.

**Keywords:** strengthening of concrete structures of hydrotechnical erections; external reinforcement; composite materials based on carbon fiber; design features of reinforced concrete structures of hydrotechnical erections; methodology for durability calculation, bearing capacity of a structure; moment of deflection.