

УДК 627.8

**ВЛИЯНИЕ СООТНОШЕНИЯ МОДУЛЕЙ УПРУГОСТИ СИСТЕМЫ
«ПЛОТИНА-ОСНОВАНИЕ» НА ВЕЛИЧИНУ КОНЦЕНТРАЦИИ
НАПРЯЖЕНИЙ (НА ИХ КОНТАКТЕ) И НА СМЕЩЕНИЯ СОСЕДНИХ
СЕКЦИЙ**

В.И. ВОЛКОВ, *к.т.н., профессор,*
А.И. ГОЛЫШЕВ, *к.т.н., доцент,*
А.А. УЧЕВАТКИН, *аспирант,*
Д.С. ДМИТРИЕВ, *аспирант*

*ФГБОУ ВО "Российский государственный аграрный университет – МСХА
имени К.А.Тимирязева"*

127550, г. Москва, ул. Прянишникова, 19

*Светлой памяти учителя, заслуженного деятеля науки РФ, д.т.н., профессора
Игоря Семеновича Румянцева*

*Исследуется влияние соотношения модулей упругости системы «гравитационная
бетонная плотина - основание» на величину концентрации напряжений, возникающих в
зоне контакта, и на смещения соседних секций с применением современного расчетно-
го программного комплекса, реализующего метод конечных элементов.*

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: безопасность бетонных плотин, концентрация напряжений, осадки и горизонтальные перемещения бетонных гравитационных плотин, МКЭ.

При разработке вышеуказанной методики были учтены характерные особенности железобетонных конструкций ГТС. Массивные железобетонные конструкции ГТС характеризуются значительными габаритами (более 1 м); применением бетонов и арматуры невысоких классов; невысокими процентами армирования (менее 1%); особым характером трещинообразования (в том числе, наличием магистральных трещин); наличием межблочных строительных швов; воздействием водной среды, включая противодействие воды в раскрывшихся трещинах и межблочных швах.

Также были учтены положения отечественных нормативно-методических документов по проектированию железобетонных конструкций гидросооружений [2, 3, 4, 5, 6], отечественный и зарубежный опыт исследований прочности железобетонных конструкций, усиленных композитными материалами [1, 7, 8, 9, 10].

В соответствии с разработанной методикой условие прочности при действии поперечных сил имеет вид:

$$\gamma_{ic}\gamma_n Q \leq \gamma_c (\Sigma \gamma_s R_{sw} A_{sw} + \Sigma \gamma_s R_{sw} A_{s,inc} \sin \alpha + \gamma_{b\tau} Q_b + Q_{fw}) \quad (1)$$

где Q – поперечная сила, действующая в наклонном сечении, т.е. равнодействующая всех поперечных сил от внешней нагрузки, расположенных по одну сторону от рассматриваемого сечения;

$$\Sigma \gamma_s R_{sw} A_{sw} + \Sigma \gamma_s R_{sw} A_{s,inc} \sin \alpha$$

– суммы поперечных усилий, воспринимаемых соответственно хомутами и отогнутыми стержнями, пересекающими наклонное сечение. Расчетная схема изображена на рис. 1.

Поперечное усилие, воспринимаемое бетоном сжатой зоны в наклонном сечении, определяется по формуле:

$$Q_b = \varphi_2 \varphi_3 \gamma_j R_{bt} b h_0 \operatorname{tg} \beta, \quad (2)$$

где $\varphi_2 = 0,5 + 2$; $\varphi_3 = 1,0$ - для элементов с высотой сечения $h < 0,6$ м; $0,83$ - для элементов с высотой сечения $h \geq 0,6$ м; γ_j - коэффициент, учитывающий влияние строительных швов в зоне действия поперечных сил, принимаемый по таблице 1.

Таблица 1. Значение коэффициента γ_j

l_j/h_j	0,45 и меньше	От 0,46 до 0,64	0,65 и выше
γ_j	1.0	$1 - [(l_j/h_j) - 0.45]$	0.80

Обозначения, принятые в табл. 1: l_j - расстояние между сечением по шву и нормальным сечением, проходящим через конец наклонного сечения в сжатой зоне; h_j - высота сечения по шву.

Прочность бетона при растяжении R_{bt} в сечении, совпадающем с контактным строительным швом, принимается с коэффициентом равным 0,5 (то есть снижается в 2 раза).

С учетом вышесказанного зависимость (2) для поперечного усилия Q_b^m , воспринимаемого бетоном в зоне поперечного строительного шва, приобретает вид:

$$Q_b^m = 0,5 \varphi_2 \varphi_3 \gamma_j R_{bt} b h_0 \operatorname{tg} \beta. \quad (3)$$

Относительная высота сжатой зоны сечения ξ определяется по формулам: для изгибаемых элементов:

$$\xi = \mu R_s / R_b,; \quad (4)$$

для внецентренно сжатых во всех случаях и внецентренно растянутых элементов с большим эксцентриситетом:

$$\xi = \mu R_s / R_b \pm N / (b h_0 R_b). \quad (5)$$

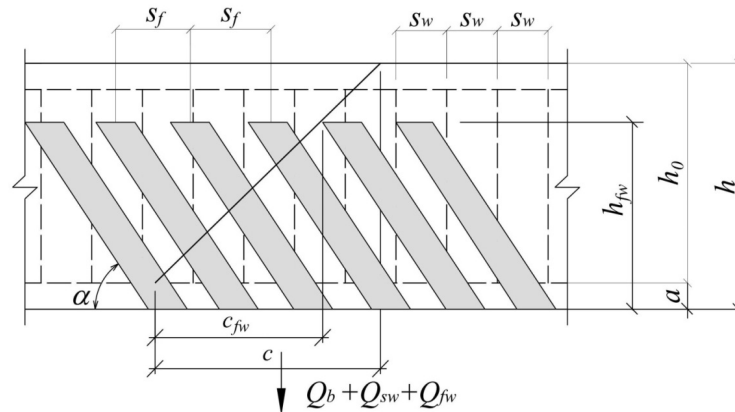


Рис. 1. Схема усилий при расчете железобетонных элементов с внешним армированием из полимерных композитов по наклонному сечению на действие поперечных сил

Для внецентренно растянутых элементов с малым эксцентриситетом следует принимать $Q_b = 0$. Угол между наклонным сечением и продольной осью элемента определяется по формуле:

$$\operatorname{tg} \beta = 2 / [1 + M / (Q h_0)]. \quad (6)$$

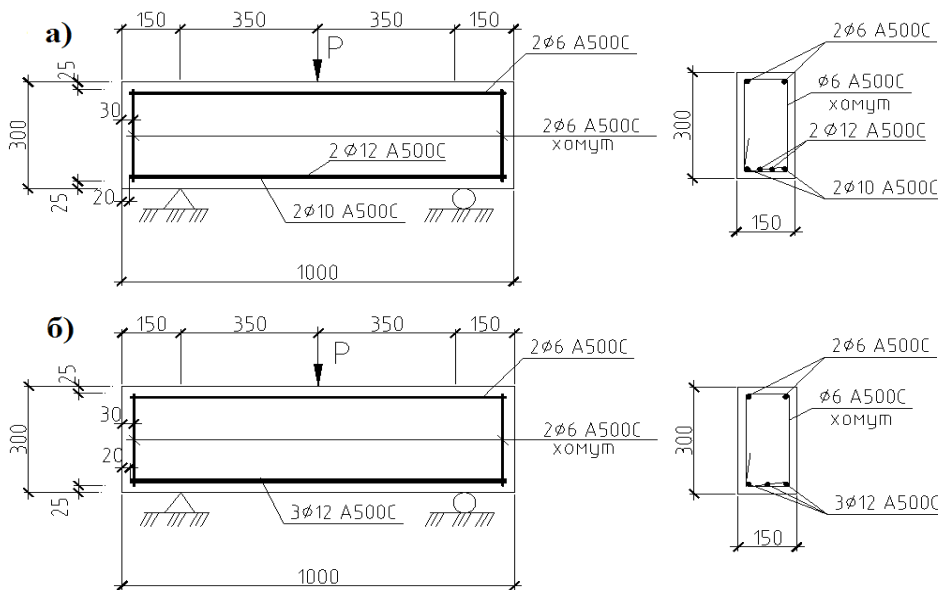


Рис. 2. Конструкция, схемы армирования и схемы испытаний железобетонных балок-моделей из бетона В15 (а) и В25 (б) на действие поперечной силы (совместно с изгибающим моментом)

Значение $\operatorname{tg} \beta$ принимается не более 1,5 и не менее 0,5; Q_{fw} – поперечное усилие, воспринимаемое внешним армированием, определяется по формуле:

$$Q_{fw} = \psi_f A_{f,sh} \sigma_{fu}, \quad (7)$$

где ψ_f - коэффициент, зависящий от схемы наклейки хомутов; $A_{f,sh}$ - расчетная площадь хомутов внешнего армирования, определяется по формуле:

$$A_{f,sh} = 2 n t_f s_w \sin \alpha;$$

σ_{fu} – расчетное напряжение во внешнем армировании, определяемое по формуле: $\sigma_{fu} = \varepsilon_{fe} E_f$; E_f – модуль упругости внешнего армирования; ε_{fe} – расчетные деформации внешнего армирования, принимаются равными 0,0035.

В целях экспериментального обоснования положений разработанной методики были проведены исследования прочности моделей железобетонных конструкций ГТС, усиленных посредством внешнего армирования на основе углеродных лент и углеродных композитных ламелей, при действии поперечных сил (совместно с изгибающими моментами).

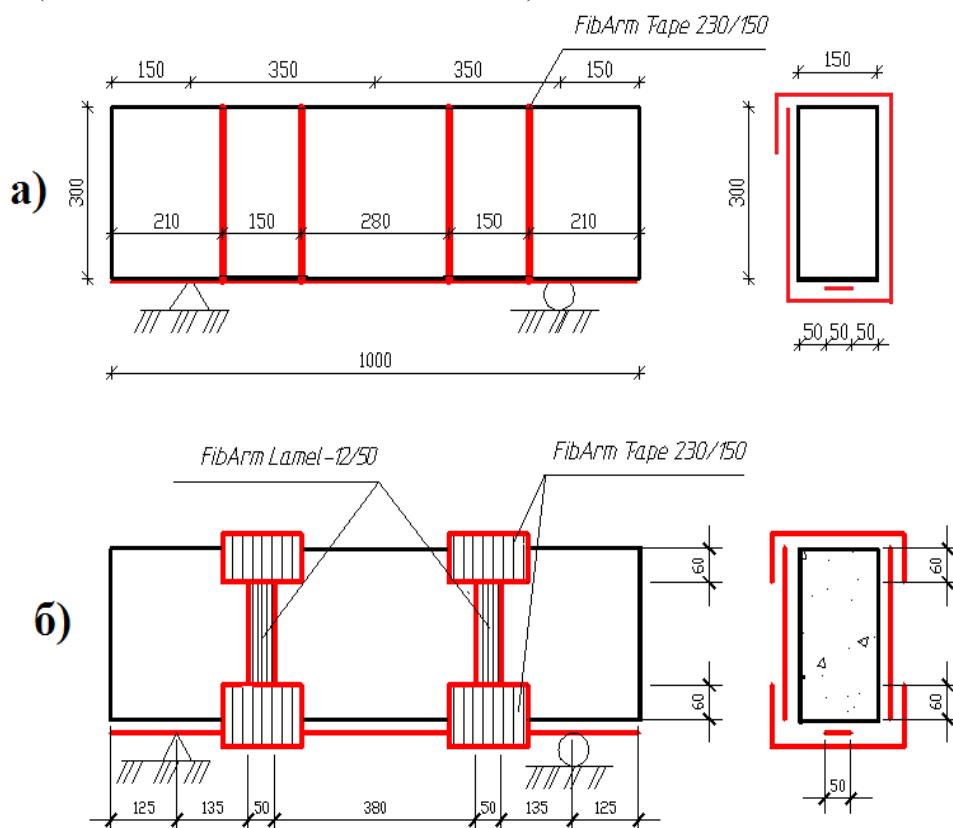


Рис. 3. Схемы оклейки железобетонных балок-моделей углеродными лентами (а) и углеродными композитными ламелями (б) на действие поперечной силы (совместно с изгибанием моментом)

Для проведения экспериментальных испытаний на действие поперечной силы (совместно с изгибающим моментом) были изготовлены железобетонные модели в форме балок с линейными размерами 1000×300×150 мм (рис. 2).

Для испытаний изготавливались две серии железобетонных моделей из бетонов классов В15 и В25 с осадкой конуса 12-16 см и различного армирования из арматуры класса А500С.

Рабочее армирование выполнялось из арматуры класса А500С в количестве 2 диаметра 10 мм + 2 диаметра 12 мм (одна серия моделей из бетона класса В15) и 3 диаметра 12 мм (другая серия моделей из бетона класса В25). У торцов и в центре пролета устанавливались поперечные хомуты диаметром 6 мм (рис. 2).

Каждая серия включала 3 группы моделей, состоящих из пары моделей-близнецов. Одна группа моделей-близнецов изготавливалась без усиления, другая группа моделей-близнецов усиливалась углеродными лентами, третья группа моделей-близнецов усиливалась углеродными композитными ламелями, что

позволило осуществить сопоставление результатов испытаний балок-моделей без усиления и балок-моделей с различными вариантами усиления.

При выполнении усиления железобетонных балок-моделей применялись углеродные ленты типа FibArmTape 230/300 (шириной 150 мм в два слоя), а также углеродные ламели типа FibArmLamel 12/50 (шириной 50 мм, толщиной 1,2 мм) (рис.3). При проведении экспериментальных исследований определялось повышение несущей способности моделей, усиленных углеродными лентами и углеродными композитными ламелями, по сравнению с контрольными железобетонными моделями без усиления СВА.

В ходе экспериментальных исследований балок-моделей на действие поперечной силы (совместно с изгибающим моментом) были получены следующие основные результаты.

Разрушение балок-моделей из бетона В15 с армированием 0,94%, выполненных без усиления, было зафиксировано при нагрузках 133,7...149,2 кН.

Разрушение балок-моделей из бетона В15 с армированием 0,94%, усиленных углеродными лентами, было зафиксировано при нагрузках 207,7...276,9 кН, что соответствует эффективности усиления по сравнению с обычными моделями (без усиления) равной, в среднем, 1,85 раза.

Разрушение балок-моделей из бетона В15 с армированием 0,94%, усиленных углеродными композитными ламелями, было зафиксировано при нагрузке 266,0 кН, что соответствует эффективности усиления по сравнению с обычными моделями (без усиления) равной, в среднем, 1,98 раза.

Разрушение балок-моделей из бетона В25 с армированием 0,85%, выполненных без усиления, было зафиксировано при нагрузках 135,3...165,0 кН.

Таблица 2

Балки	Разрушающая нагрузка	
	Фактическая (экспериментальная), кН	Расчетная при фактических прочностных характеристиках, кН
Серия БП-15		
Неусиленные БП-15-3	133,7	123,8
БП-15-4	149,2	140,8
Усиленные углеродной лентой		
БП-15-1	207,7	238,7
БП-15-2	276,9	256,4
Усиленные углеродной ламелью		
БП-15-5	266,0	250,9
БП-15-6	266,0	255,8
Серия БП-25		
Неусиленные БП-25-5	165,0	155,7
БП-25-6	135,3	135,3
Усиленные углеродной лентой		
БП-25-1	305,9	275,6
БП-25-2	342,0	275,8
Усиленные углеродной ламелью		
БП-25-3	270,0	245,5
БП-25-4	317,9	274,1

Разрушение балок-моделей из бетона В25 с армированием 0,85%, усиленных углеродными лентами, было зафиксировано при нагрузках 305,9...342,0 кН, что соответствует эффективности усиления по сравнению с обычными моделями (без усиления) равной, в среднем, 2,15 раза.

Разрушение балок-моделей из бетона В25 с армированием 0,85%, усиленных углеродными композитными ламелями, было зафиксировано при нагрузках 270,0...317,9 кН, что соответствует эффективности усиления по сравнению с обычными моделями (без усиления) равной, в среднем, 2,18 раза.

В табл. 2 представлено сопоставление результатов расчетов на основе разработанной методики с экспериментальными данными. Таким образом, разработанная методика расчета прочности железобетонных конструкций гидросооружений, усиленных внешним армированием на основе композитных материалов, при действии поперечных сил обоснована экспериментально.

Л и т е р а т у р а

1. 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.
2. СП 41.13330.2012. Бетонные и железобетонные конструкции гидротехнических сооружений. Актуализированная редакция СНиП 2.06.08-87. – М.: 2012. – 68 с.
3. П-46-89. Пособие по проектированию бетонных и железобетонных конструкций гидротехнических сооружений (без предварительного напряжения) к СНиП 2.06.08-87. – Л.:1990. – 276 с.
4. СТО 17330282.27.140.002-2008: Гидротехнические сооружения ГЭС и ГАЭС. Условия создания. Нормы и требования. Книга 3. Приложение Г. Правила проектирования бетонных и железобетонных конструкций гидротехнических сооружений. – М.: 2007. – 86 с.
5. Залесов А.С., Рубин О.Д., Лисичкин С.Е. Повышение надежности массивных гидротехнических сооружений на основе совершенствования норм проектирования // *Гидротехническое строительство*. – 1994. – №9. – С.46-48.
6. Караваев А.В., Кауфман А.Д., Судаков В.Б., Рубин О.Д., Лисичкин С.Е., Боярский В.М., Сергеев И.П. О проекте норм проектирования бетонных и железобетонных конструкций гидротехнических сооружений // *Гидротехническое строительство*. – 2003. – № 6. – С. 34-35.
7. Zilch, K., Neidermeier, R and Finckh, W. Strengthening of concrete structures with adhesively bonded reinforcement// *Beton-Kalender*, Berlin. – 2014. – Pp. 29-32.
8. Kim, H., Kim, M., Ko, M., and Lee, Y. (2015). Shear Behavior of Concrete Beams Reinforced with GFRP Shear Reinforcement// *International Journal of Polymer Science*. – № 1. – Pp. 1-8.
9. Mofidi, A. and Chaallal, O. Tests and Design Provisions for Reinforced-Concrete Beams Strengthened in Shear Using FRP Sheets and Strips// *International Journal of Concrete Structures and Materials*. – 2014. – № 7. – Pp. 117-128.
10. Menegotto M, Monti G., Liotta M.A.. Modelling shear mechanism in FRP-strengthened R/C beams// *Architecture Civil Engineering Environment*. – 2009. – No 3. – Pp. 57-68.

R e f e r e n c e s

1. Aleksandrov, A.V., Rubin, O.D., Lisichkin, S.E., Balagurov, V.B. (2014). Raschetnoe obosnovanie i tekhnicheskie resheniya po usileniyu zhelezobetonnih konstrukcij GES (GAES) imeyushchih treshchiny razlichnogo napravleniya pri dejstvii kompleksa nagruzok, *Stroitel'naya Mekhanika Inzhenernyh Konstruktsiy i Sooruzheniy*, № 6, pp. 50-54.
2. SP 41.13330.2012. Betonnye i Zhelezobetonnnye Konstrukcii Gidrotekhnicheskikh Sooruzhenij. Aktualizirovannaya redakciya SNIP 2.06.08-87, Moscow, 2012, 68 p.
3. P46-89. Posobie po Proektirovaniyu Betonnyh i Zhelezobetonnnyh Konstrukcij Gidrotekhnicheskikh Sooruzhenij bez Predvaritelnogo Napryazheniya k SNIP 2.06.08-87, L., 1990, 247 p.
4. СТО 17330282.27.140.002-2008: Gidrotekhnicheskije sooruzheniya GES i GAES. Usloviya sozdaniya. Nnormy i trebovaniya, Книга 3: Prilozhenie G, Pravila proektirovaniya betonnyh i zhelezobetonnnyh konstrukcij gidrotekhnicheskikh sooruzhenij, Moscow, 2007, 86 p.
5. Zalesov, A.S., Rubin, O.D., Lisichkin, S.E. (1994). Povyshenie nadezhnosti massivnyh gidrotekhnicheskikh sooruzhenij na osnove sovershenstvovaniya norm proektirovaniya, *Gidrotekhnicheskoe Stroitel'stvo*, № 9, pp.46-48.

6. Karavaev, A.V., Kaufman, A.D., Sudakov, V.B., Rubin, O.D., Lisichkin, S.E., Boyarskij, V.M., Sergeev, I.P. (2003). O proekte norm proektirovaniya betonnyh i zhelezobetonnyh konstrukcij gidrotekhnicheskikh sooruzhenij, *Gidrotekhnicheskoe stroitelstvo*, № 6, pp. 34-35.
7. Zilch, K., Neidermeier, R and Finckh, W. (2014). Strengthening of concrete structures with adhesively bonded reinforcement, *BetonKalender*, Berlin, pp. 29-32.
8. Kim, H., Kim, M., Ko, M., and Lee, Y. (2015). Shear Behavior of Concrete Beams Reinforced with GFRP Shear Reinforcement, *International Journal of Polymer Science*, № 1, pp. 1-8.
9. Mofidi, A. and Chaallal, O. (2014). Tests and Design Provisions for Reinforced-Concrete Beams Strengthened in Shear Using FRP Sheets and Strips, *International Journal of Concrete Structures and Materials*, № 7, pp. 117-128.
10. Menegotto, M., Monti, G., Liotta, M.A. (2009). Modelling shear mechanism in FRP-strengthened R/C beams, *Architecture civil engineering environment*, No 3, pp. 57-68.

DEVELOPMENT OF THE METHOD OF CALCULATION OF THE STRENGTH OF REINFORCED CONCRETE STRUCTURES OF THE HYDRAULIC ERECTIONS STRENGTHENED BY MEANS OF EXTERNAL REINFORCING ON THE BASIS OF COMPOSITE MATERIALS UNDER ACTION OF SHEAR FORCES

O.D. Rubin, S.E. Lisichkin, A.V. Aleksandrov, O.A. Simakov

To justify the use of the external reinforcement with the composite materials in the strengthening of reinforced ferroconcrete structures of hydraulic erections, a complex research was carried out. The method of calculation of strength of ferroconcrete structures of hydraulic erections, reinforced by external reinforcement by composite materials under the action of cross forces was developed. In order to justify the experimental design procedure the strength of reinforced concrete structures of hydraulic structures models, reinforced by an external reinforcement based on carbon tape and carbon composite slats, under the action of shear forces (with bending moments) was studied.

Keywords: hydraulic erections, reinforced concrete structure, strengthening, reconstruction, external reinforcement, composite materials, carbon composite slats, strength analysis, experimental research, shear force.

