

Деформативность бетона коротких сжатых элементов, усиленных внешним композитным армированием, при трех видах напряженного состояния

П.П. Польской, С. В. Георгиев

*Донской государственной технической университет,
г. Ростов-на-Дону*

Аннотация: В статье представлены результаты сопоставления средних опытных значений относительных деформаций тяжёлого бетона класса В30-35 – ε_b и ε_{bt} , которые получены при испытании коротких сжатых стоек, усиленных внешним композитным армированием на основе углепластика. Варьировалось внешнее поперечное и продольное армирование, а также виды напряженно-деформированного состояния: условно центрально сжатые элементы ($e_0=0$); элементы, загруженные при малых эксцентриситетах т. е. при $e_0=2,0\text{см}$ ($0,16h$) и больших $e_0=4,0\text{см}$ ($0,32h$). Дана оценка влияния различных вариантов композитного армирования на изменение напряженно-деформированного состояния бетона при трех значениях величины осевого эксцентриситета e_0 .

Ключевые слова: бетон, железобетон, арматура, опытные образцы, композит, сжатие, растяжение, относительные деформации.

Увеличение объемов промышленного производства требует резкого увеличения объемов капитального строительства. Последнее, в свою очередь, невозможно без использования новых видов конструкций, на основе новых видов современных строительных материалов и технологий выполнения строительного-монтажных работ.

Одновременно с ростом объемов строительства увеличиваются и объем затрат, необходимых для ремонта, восстановления и усиления существующих и вновь возводимых зданий и сооружений.

С учетом изложенного, в строительстве растет объем использования высокопрочных бетонов и железобетона на их основе. Всё шире используются композитные материалы для изготовления различного вида арматуры, которая применяется по двум направлениям. В качестве стержневой рабочей арматуры и внешней рабочей арматуры в виде тканей или полос (ламинатов), которые используются при усилении конструкций.

Исследование изгибаемых [1] и сжатых [2] железобетонных элементов, усиленных внешней композитной арматурой, за рубежом началось в конце

70-х и в начале 80-х годов прошлого столетия. В России активная фаза исследований в этом направлении началась в начале 21 столетия.

Начиная с 2006 года, комплексные исследования, связанные с инновационными технологиями, а также по исследованию высокопрочных бетонов и композитных материалов в качестве внутренней и внешней арматуры, начались в лаборатории кафедры железобетонных и каменных конструкций Ростовского государственного строительного университета. В настоящее время, кафедра ЖБК в составе архитектурно-строительной Академии входит в состав Донского государственного строительного университета (ДГТУ).

В исследованиях [3,4] приведены предложения ученых кафедры по совершенствованию расчета сжатых железобетонных элементов из высокопрочного бетона. Использованию стержневой композитной арматуры в качестве внутренней-рабочей посвящены работы [5-7].

Исследование прочности изгибаемых элементов, усиленных внешней композитной арматурой, приведено в работах [8,9], а предложения по совершенствованию расчёта прочности, деформативности и ширины раскрытия трещин подробно отражены в работах [10-12].

Наибольшее количество работ, связано с исследованиями сжатых железобетонных элементов, имеющих различные варианты внешнего поперечного и продольного армирования, а также различную гибкость и величину эксцентриситета приложения нагрузки [13-16].

В данной статье нашло отражение сопоставления средних опытных значений относительных деформаций бетона ε_b или ε_b и ε_{bt} на противоположных от линии приложения нагрузки гранях коротких опытных стоек, которые в зависимости от величины осевого эксцентриситета приложения нагрузки e_0 бывают сжатыми или менее сжатыми, и сжатыми либо растянутыми.

Это необходимо для того, чтобы четко выделить тот или иной вид напряженно-деформированного состояния опытных образцов, который возникает при различных вариантах усиления и изменении величины осевого эксцентриситета.

Весь вопрос заключается в том, что в первой редакции свода Правил по усилению железобетонных конструкций композитными материалами отсутствуют предложения по расчету усиленных конструкций, для случая малых эксцентриситетов приложения нагрузок, т. е. когда $0,1h \leq e_0 \leq 0,3h$. Однако такой случай расчета имеет место в любом многоэтажном монолитно-каркасном здании.

Ниже рассмотрены данные по деформативности бетона коротких железобетонных стоек с гибкостью $\lambda_h=10$ с одинаковыми размерами сечения $250 \times 125(h)$ и длиной 1200 мм, которые были изготовлены из тяжелого бетона класса В30-35.

Продольное стальное армирование стоек состояло $4\text{Ø}12\text{A}500$, а поперечное – из вязаных хомутов $\text{Ø}6\text{A}240$, расположенных с шагом 180 мм.

Результаты испытания по прочности и характеристика опытных образцов даны в табл. 1, а графики изменения относительной деформации бетона на сжатие (ε_b) или растяжение (ε_{bt}) для различных вариантов усиления и величины осевого эксцентриситета (e_0) – изображены на рис. 1-3.

Сопоставление графиков изменения относительных деформаций бетона на сжатой (ε_{bt}), менее сжатой (ε_{b2}), либо сжатой (ε_b) и растянутой (ε_{bt}) гранях бетона для 9 различных вариантах композитного усиления, выполнено отдельно по каждому виду напряженно-деформированного состояния т. е. при эксцентриситетах ($e_0=0$); $e_0=2,0\text{см}$ ($0,16h$) и $e_0=4,0\text{см}$ ($0,32h$).

Таблица № 1

Характеристика и результаты испытания эталонных и усиленных коротких опытных образцов с гибкостью $\lambda_h=10$, при эксцентриситетах приложения нагрузки $e_0=0; 2,0$ и $4,0$ см.

Характеристика опытных образцов	Порядковый номер	Шифр стоек	Класс бетона B	Вариант усиления	Опытные значения	
					Прочность kH $N_s; N_{s,f}$	Прогибы $f^{exp}, мм$
1	2	3	4	5	6	7
Серия А. Осевой эксцентриситет $e_0=0$. Сечение-250x125 (h) мм $l_0=1200$ мм.	1	АК	33,2	Эталон	1150	1,165
	2	АКУ-Х ₁	30,0	$b_f = 50 мм; s_f = 190 мм; s = 140 мм$	1190,5	0,4
	3	АКУ-Х ₆	39,3	$b_f = 50 мм; s_f = 115 мм; s = 65 мм$	1600	2,54
	4	АКУ-Х ₅	30,1	$b_f = 720 мм$ (Обойма)	1625	0,7
	5	АКУ- Х ₁ L _ц	31,8	$b_f = 50 мм; s_f = 190 мм; s = 140 мм; 4L_u$	1100	0,79
	6	АКУ- Х ₁ R _ц	30,1	$b_f = 50 мм; s_f = 190 мм; s = 140 мм;$ 4Ø8R _ц	1379	1,82
Серия Б. Осевой эксцентриситет $e_0=2,0$ см. Сечение-250x125 (h) мм $l_0=1200$ мм.	7	БК	30,3	Эталон	592,5	5,2
	8	БКУ-Х ₁	30,0	$b_f = 50 мм; s_f = 190 мм; s = 140 мм$	778,9	7,5
	9	БКУ-Х ₂	30,3	$b_f = 50 мм; s_f = 145 мм; s = 95 мм$	794,7	5,4
	10	БКУ- Х ₅	32,4	$b_f = 720 мм$ (Обойма)	844,0	7,61
	11	БКУ- Х ₂ Lc	32,4	$b_f = 50 мм; s_f = 145 мм; s = 95 мм$ 2-а углеламината в сжатой зоне: $b = 50 мм; t = 1,4 мм$	800,0	6,07
	12	БКУ-Х ₁ Lp	31,8	$b_f = 50 мм; s_f = 190 мм; s = 140 мм$ 2-а углеламината растянутой зоне: $b = 50 мм; t = 1,4 мм$	700,0	11,42
Серия В. Осевой эксцентриситет $e_0=4,0$ см. Сечение-250x125 (h) мм $l_0=1200$ мм.	13	ВК	33,2	Эталон	422,2	9,15
	14	ВКУ-Х ₁	33,2	$b_f = 50 мм; s_f = 190 мм; s = 140 мм$	482,5	10,2
	15	ВКУ-Х ₁ Lp	33,2	$b_f = 50 мм; s_f = 145 мм; s = 95 мм$ 2-а углеламината в растянутой зоне: $b = 50 мм; t = 1,4 мм$	530	9,29
	16	ВКУ-Х ₃ Lp	39,4	$b_f = 50 мм; s_f = 190 мм;$ Хомут в центре $b_f = 240 мм;$ 2-а углеламината в растянутой зоне: $b = 50 мм; t = 1,4 мм$	608	10,8

Для удобства анализа, в табл. 1 одновременно с шифром представлен порядковый номер опытных образцов. Отметим также, что оценка деформативности бетона осуществлялась методом прямого сопоставления

относительных деформаций бетона между эталонными и усиленными образцами.

Сжатые элементы при эксцентриситете $e_0=0$

Рассматривая относительные деформации бетона, на противоположных (относительно размера h) гранях (а) и (б) коротких стоек (рис. 1) можно отметить, что эталонные стойки (1), а также усиленные – (2) и (5), у которых хомуты – X_1 расположены с зазором $s=140$ мм (шагом $s_f=190$ мм), имеют практически одинаковые значения относительных деформаций бетона на сжатие – ε_b . Это подтверждают данные по жесткости сжатых элементов при различных вариантах внешнего композитного армирования, приведенные в статье авторов настоящего сборника. Подтверждение получает то, что поперечные хомуты X_1 расположенные с указанным шагом, либо хомуты X_1 в сочетании с продольными элементами усиления, наклеенными на обеих гранях, практически не влияют на увеличение прочности. Графики зависимости $N-\varepsilon_b$ для стоек (3) и (4) показывают, что относительные деформации бетона становятся значительно меньше, если зазор хомутов X_3 в свету уменьшается до 65 мм, либо если стойки усилены сплошной обоймой (вариант X_5). Следовательно, эффект влияния стесненных условий работы бетона проявляется в большей степени и приводит к увеличению прочности усиленных образцов.

Стойка (6), усиленная клеиванием в штрабу 4-х стержней диаметром 8 мм в сочетании с поперечными хомутами X_1 , показала практически одинаковые с эталонами образцами относительные деформации бетона на сжатие на противоположных относительно оси приложения нагрузки гранях. Незначительное различие для всех стоек серии А абсолютных значений относительных деформаций бетона (ε_b) на гранях а) и б), при эксплуатационных уровнях нагрузки, четко подтверждает то, что нагрузка приложена только со случайным эксцентриситетом – e_0 .

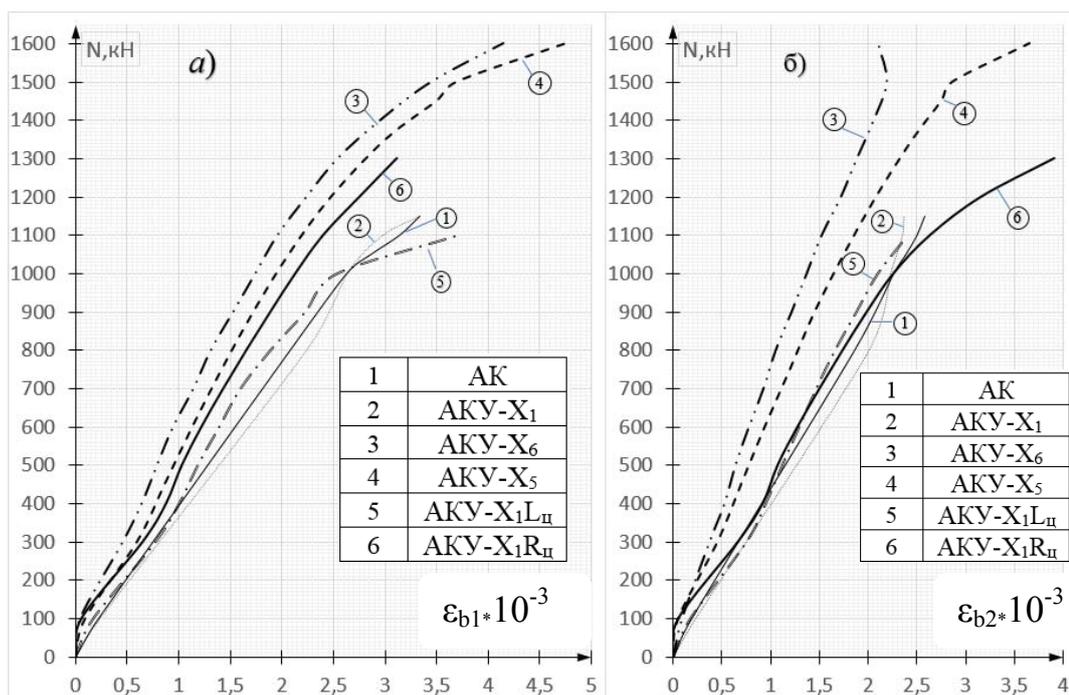


Рис. 1. Сопоставление средних опытных значений относительных деформаций бетона на сжатие – ε_{b1} и ε_{b2} на противоположных гранях коротких стоек ($\lambda_n=10$) в зависимости от величины нагрузки и вариантов композитного усиления при осевом эксцентриситете $e_0=0$.

Сжатые элементы с малым эксцентриситетом $e_0=2,0$ см (0,16h)

При сопоставлении относительных деформаций бетона для коротких стоек при $e_0=2$ см (рис. 2), видно, что в отличие от условно центрально-сжатых элементов, влияние поперечного и продольного армирования проявляется уже по-разному. На грани а), расположенной ближе к оси приложения нагрузки, относительные деформации во всём диапазоне – только сжимающие. На противоположной грани – б) деформации на сжатие малы и постепенно переходят в растянутые - ε_{bt} , начиная от уровня примерно равного $0,8N_{ult}$. По-разному проявляется и влияние внешней продольной композитной арматуры. В частности, относительные деформации бетона на сжатие (ε_b) по граням а) и б) эталонной стойки (7) и стойки (12), которая имеет комбинированное усиление хомутами X_1 в сочетании с полосами-

ламинатами, продольно расположенными на менее сжатой (растянутой) грани, – отличаются незначительно.

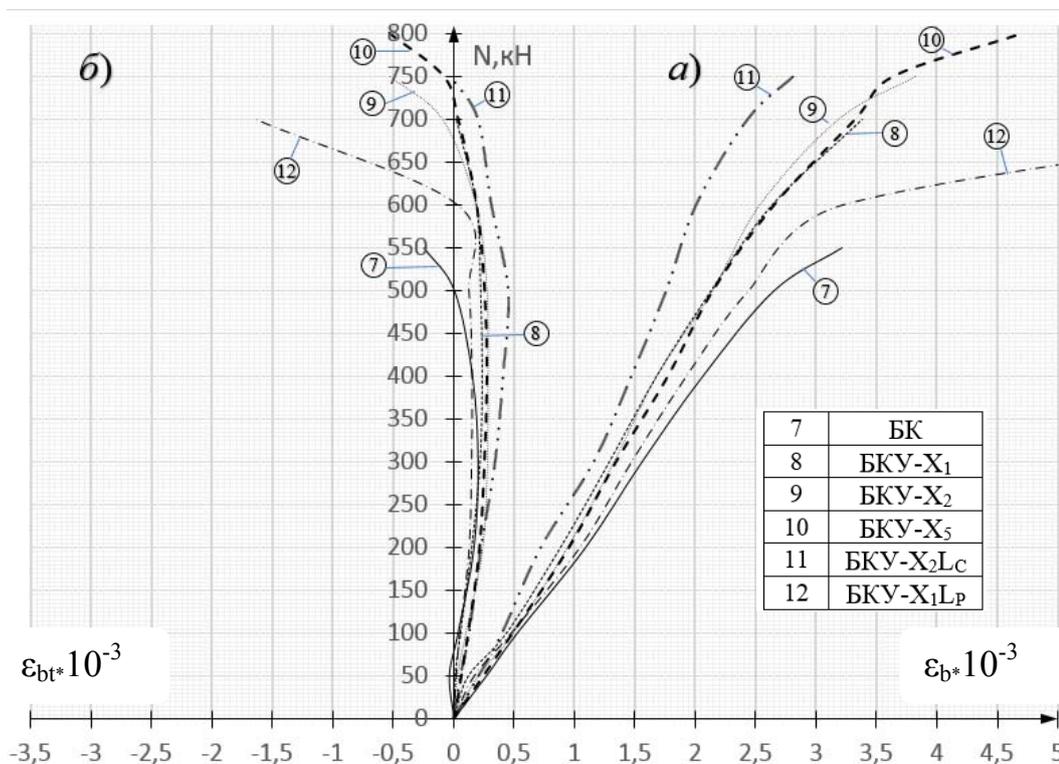


Рис. 2. Сопоставление средних опытных значений относительных

деформаций бетона на сжатие – ε_b (а) и растяжение – ε_{bt} (б) на противоположных гранях коротких ($\lambda_h=10$) стоек в зависимости от величины нагрузки и вариантов композитного усиления при осевом эксцентриситете $e_0=2,0\text{см}$ ($0,16h$)

Аналогичный вариант армирования с расположением продольной композитной арматуры усиления на более сжатой грани стойки приводит уже к некоторому увеличению несущей способности стойки (11). Стойки (9), (10), усиленные соответственно только поперечными хомутами X_1 с зазором 140мм; X_2 – зазор 95 мм; либо сплошной обоймой (вариант X_5), приводит к более резкому уменьшению относительных деформаций бетона на сжатой грани а) и практически до разрушения поддерживает сжимающие деформации на грани б), способствуя перераспределению напряжений. Следовательно, способствует и повышению несущей способности. Однако

уровень повышения несущей способности при одинаковом поперечном армировании ниже, по сравнению с элементами со случайными эксцентриситетами.

Следует отметить также, что, для коротких стоек $\lambda_h=10$ при $e_0=0,16h$, влияние гибкости становится заметным, но не критичным. Распределение относительных деформаций на разных гранях показывает, что при малых эксцентриситетах и гибкости $\lambda_h \leq 10$, более эффективным остаётся вариант внешнего поперечного армирования.

Сжатые элементы с большим эксцентриситетом ($e_0=4\text{см}=0,32h$).

Графики зависимости значений относительных деформаций ε_s и ε_{st} от величины нагрузки – N для коротких стоек, загруженных с большими эксцентриситетами $e_0=4,0\text{см}$ или $0,32h$, приведены на рис. 3. Как не трудно заметить, указанные опытные образцы имеют уже четко выраженную двухзначную эпюру относительных деформаций, т.е. сжатую – а) и растянутую – б) зоны.

Следовательно, речь идет о несущей способности сжато-изогнутых элементов с расчетом по нормальным сечениям. Поэтому, ниже, относительные деформации бетона рассматриваем отдельно для сжатой – ε_s и растянутой – ε_{st} зон.

Короткая эталонная стойка (13) показывает наибольшие относительные деформации на сжатие. Несколько меньше значения ε_s имеют стойки (14) и (15), усиленные только поперечными хомутами X_1 или хомутами X_1 в сочетании с продольным армированием растянутой грани. Обособленно меньшие деформации показал образец (16) с поперечным широким хомутом X_3 , установленном в центре высоты стоек в сочетании с продольным композитным армированием растянутой грани.

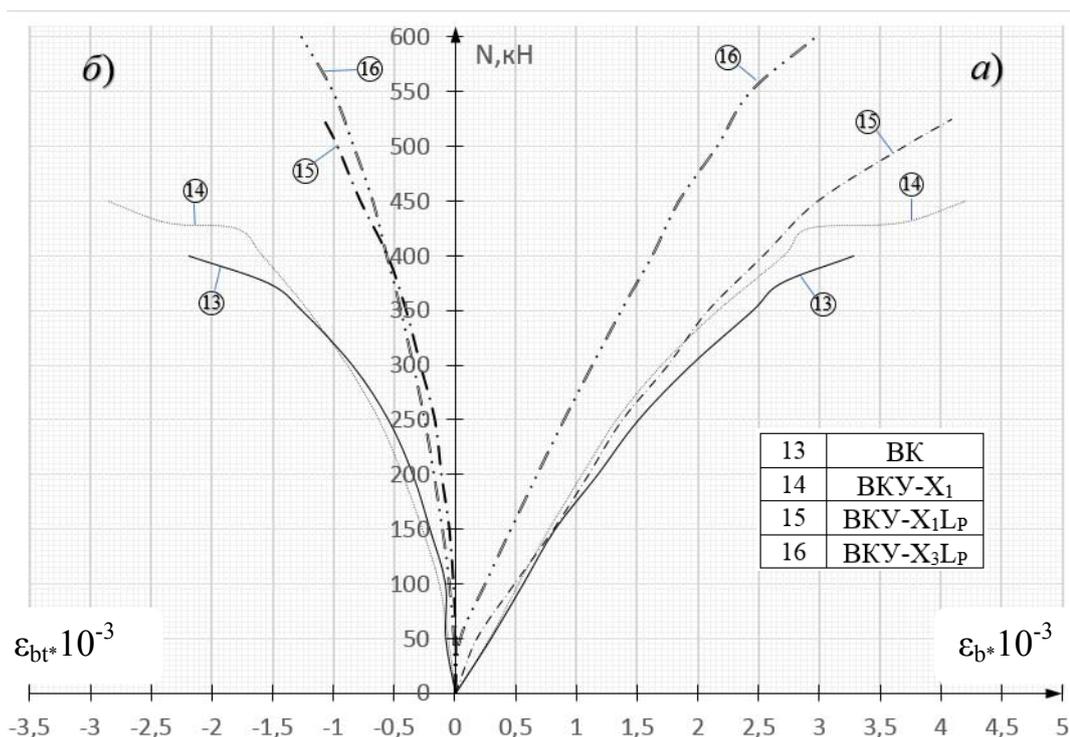


Рис. 3. Сопоставление средних опытных значений относительных

деформаций бетона на сжатие – ε_b (а) и растяжение – ε_{bt} (б) на противоположных гранях коротких ($\lambda_h=10$) стоек в зависимости от величины нагрузки и вариантов композитного усиления при осевом эксцентриситете $e_0=4,0\text{см}$ ($0,32h$).

Относительные деформации на растяжение ε_{bt} оказались попарно одинаковыми. Наибольшие они в образцах (13) и (14), которые усилены только внешней поперечной арматурой. Наименьшие значения ε_{bt} имели образцы (15) и (16), имеющие усиление внешней продольной композитной арматурой в сочетании с поперечными хомутами, которые при наличии больших эксцентриситетов выполняют роль анкеров для продольной арматуры. С учетом проведенного анализа о влиянии различных вариантов внешнего композитного армирования на изменение относительной деформаций бетона при изменении эксцентриситета приложения нагрузки, можно сделать следующие выводы:

1. Относительные деформации бетона, зафиксированные на наружных гранях опытных образцов при трех значениях величины осевого эксцентриситета, показали четкое изменение напряженно-деформированного состояния, как эталонных, так и усиленных внешним композитным армированием опытных образцов. Это состояние полностью соответствует существующей классификации: условно центрально сжатые или элементы со случайным эксцентриситетом ($e_0=0$); элементы, работающие с малыми ($e_0=0,16h$) и большими ($e_0=0,32h$) эксцентриситетами.

2. Варианты усиления, при которых опытные образцы показали наименьшее значение относительных деформаций на сжатие (ε_s) и растяжение (ε_{st}), соответствуют наибольшей жесткости в вариантах усиления и, соответственно, наибольшей прочности опытных образцов.

3. При осевом приложении нагрузки ($e_0=0$) критерием оценки эффективности вариантов усиления являются относительные деформации бетона на сжатие – ε_s , а при $e_0=0,32h$ – относительные деформации бетона на растяжение – ε_{st} , что соответствует положениям свода Правил по усилению конструкций композитными материалами.

4. Наименьшие относительные деформации на сжатие – (ε_s) показали опытные образцы, усиленные поперечной обоймой при $e_0=0$, а на растяжение (ε_{st}) – образцы усиленные внешней продольной арматурой при $e_0=0,32h$.

5. При эксцентриситете приложения нагрузки $e_0=0,16h$ наибольшую жесткость элементов усиления и наименьшие относительные деформации бетона на более сжатой грани (ε_s), также показали образцы, усиленные внешней поперечной обоймой. Однако, эффективность работы этой обоймы ниже, по сравнению с центрально нагруженными элементами. Продольное армирование при гибкости стоек $\lambda_h=10$ заметной роли не оказывает.

Литература

1. Zhang Ai-hui, Jin Wei-liang, Li Gui-bing. Behavior of preloaded RC beams strengthened with CFRP laminates // Journal of Zhejiang University-SCIENCE A. 2006. Vol. 7. №3. pp. 436-444 URL: link.springer.com/article/10.1631/jzus.2006.A0436.
 2. Mander J. B.; Priestley M. J. N., Park Theoretical Stress-Strain Model for Confined Concrete // Journal of Structural Engineering. Vol. 114. №8. 1988. URL: [doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(1988\)114:8\(1804\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(1988)114:8(1804)).
 3. Мкртчян А.М., Маилян Д.Р. Расчет железобетонных колонн из высокопрочного бетона по недеформированной схеме // Научное обозрение. 2013. № 11. С. 72-76.
 4. Мкртчян А.М., Аксенов В.Н., Маилян Д.Р., Блягоз А.М., Сморгунова М.В. Особенности конструктивных свойств высокопрочных бетонов // Новые технологии. 2013. № 3. С. 135-143.
 5. Маилян Д.Р., Польской П.П., Мерват Х., Кургин К.В. О прочности балок из тяжелого бетона при использовании стальной, углепластиковой и комбинированной арматуры, расположенной в два ряда // Инженерный вестник Дона. 2013. №4. URL: ivdon.ru/magazine/archive/n4y2013/2096.
 6. Маилян Д.Р., Польской П.П., Мерват Х., Кургин К.В. О деформативности изгибаемых элементов из тяжелого бетона при двухрядном расположении углепластиковой и комбинированной арматуры // Инженерный вестник Дона. 2013. №4. URL: ivdon.ru/magazine/archive/n4y2013/2094.
 7. Польской П.П., Хишмах М., Михуб А. О возможности использования круглых углепластиковых стержней в качестве рабочей арматуры для изгибаемых элементов // Научное обозрение. 2012. №6. С. 211-213.
-

8. Польской П. П., Маилян Д. Р., Шилов А. А., Меретуков З. А. Армирование и схемы испытания наклонных сечений балок с внешним композитным усилением // Новые технологии. 2015. № 4. С. 44-48.

9. Polskoy P.P., Mailyan D.R., Dedukh D.A., Georgiev S.V. Design of reinforced concrete beams in a case of a change of cross section of composite strengthening reinforcement // Global journal of Pure and Applied mathematics. 2016. V.12. №2 pp.1767-1786 URL: [ripublication.com/gjpm16/gjpmv12n2_50.pdf](http://publication.com/gjpm16/gjpmv12n2_50.pdf).

10. О расчете ширины нормальных трещин балок, усиленных стекло и углепластиком // Маилян Д.Р., Польской П.П. Научное обозрение. 2014. № 12. С. 490-492.

11. Об уточнении расчетов прогибов балок, усиленных композитными материалами. Польской П.П., Маилян Д.Р. Научное обозрение. 2014. № 12. С. 493-495.

12. Muradyan V., Mailyan D., Lyapin A., Chubarov V. Energy-efficiency increase of reinforced concrete columns with recessed working fittings // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science 19. "Energy Management of Municipal Transportation Facilities and Transport, EMMFT 2017" 2017. p. 012032.

13. Польской П.П., Георгиев С.В. О программе исследования сжатых железобетонных элементов, усиленных композитными материалами на основе углепластика // Научное обозрение, 2014, №10-3, с. 662-666.

14. Польской П.П., Георгиев С.В. Характеристики материалов, используемых при исследовании коротких и гибких стоек, усиленных углепластиком // Научное обозрение, 2014, №10, ч.2. с. 411-414.

15. Маилян Д.Р., Польской П.П., Георгиев С.В. Конструкция каркасов и схемы испытания опытных стоек, усиленных углепластиком // Научное обозрение, 2014, № 10-3, с. 667-670.



16. Маилян Д.Р., Польской П.П., Георгиев С.В. Методики усиления углепластиком и испытания коротких и гибких стоек // Научное обозрение. 2014, №10, ч.2. с.415-418.

References

1. Zhang Ai-hui, Jin Wei-liang, Li Gui-bing. Journal of Zhejiang University-SCIENCE A. 2006. Vol. 7. №3. pp. 436-444 URL: link.springer.com/article/10.1631/jzus.2006.A0436.

2. Mander J. B.; Priestley M. J. N., Park R. Journal of Structural Engineering. Vol. 114. №8. 1988. URL: [doi.org/10.1061/ \(ASCE\) 0733-9445\(1988\)114:8\(1804\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(1988)114:8(1804)).

3. Mkrtchjan A.M., Mailjan D.R. Nauchnoe obozrenie. 2013. № 11. pp. 72-76.

4. Mkrtchjan A.M., Aksenov V.N., Mailjan D.R., Bljagoz A.M., Smorgunova M.V. Novye tehnologii. 2013. № 3. pp. 135-143.

5. Mailjan D.R., Pol'skoj P.P., Mervat H., Kurgin K.V. Inženernyj vestnik Dona (Rus), 2013, №4. URL: ivdon.ru/magazine/archive/n4y2013/2096.

6. Mailjan D.R., Pol'skoj P.P., Mervat H., Kurgin K.V. Inženernyj vestnik Dona (Rus), 2013, №4. URL: ivdon.ru/magazine/archive/n4y2013/2094.

7. Pol'skoj P.P., Hishmah M., Mihub A. Nauchnoe obozrenie. 2012. № 6. pp. 211-213.

8. Pol'skoj P. P., Mailjan D. R., Shilov A. A., Meretukov Z. A. Novye tehnologii. 2015. № 4. pp. 44-48.

9. Polskoy P.P., Mailyan D.R., Dedukh D.A., Georgiev S.V. Global journal of Pure and Applied mathematics. 2016. V. 12. №2. pp.1767-1786. URL: ripublication.com/gjpam16/gjpamv12n2_50.pdf.

10. Mailjan D.R., Pol'skoj P.P. Nauchnoe obozrenie. 2014. № 12. pp. 490-492.

11. Pol'skoj P.P., Mailjan D.R. Nauchnoe obozrenie. 2014. № 12. pp. 493-495.



12. Muradyan V., Mailyan D., Lyapin A., Chubarov V. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science 19. "Energy Management of Municipal Transportation Facilities and Transport, EMMFT 2017" 2017. p. 012032.

13. Pol'skoj P.P., Georgiev S.V. Nauchnoe obozrenie, 2014, №10-3, pp. 662-666.

14. Pol'skoj P.P., Georgiev S.V. Nauchnoe obozrenie, 2014, №10, ch.2. pp.411-414.

15. Mailjan D.R., Pol'skoj P.P., Georgiev S.V. Nauchnoe obozrenie. 2014. № 10-3. pp. 667-670.

16. Mailjan D.R., Pol'skoj P.P., Georgiev S.V. Nauchnoe obozrenie. 2014, №10, ch.2. pp. 415-418.