

Влияние различных вариантов внешнего композитного армирования на жесткость гибких сжатых элементов

П. П. Польской, С. В. Георгиев

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

Аннотация: Приводится сравнение результатов испытания по деформативности и жесткости гибких сжатых железобетонных стоек, усиленных различными вариантами внешнего поперечного и продольного армирования композитными материалами. Дана оценка влияния жесткости элементов усиления на деформативные свойства опытных образцов сечением 250x125(h) мм при гибкости $\lambda_h = e_0/h = 20$, которые были испытаны при эксцентриситетах $e_0 = 0$; 2,0 см (0,16h) и 4,0 см (0,32h).

Ключевые слова: бетон, железобетон, стойки, гибкость, композитные материалы, арматура, прочность, деформативность.

Увеличение объемов каркасно-монолитного строительства в конце 70-х годов сначала за рубежом, а затем и в нашей стране, вызвал необходимость разработки новых методов усиления монолитных безбалочных перекрытий. Это связано с тем, что традиционный метод усиления таких перекрытий с использованием железобетона, приводит к резкому увеличению постоянной нагрузки, примерно до 250 кг/м². Последняя резко усугубляет работу плиты на срез вокруг сечения колонн и приводит к необходимости усиления узла опирания плиты перекрытия на колонны.

Появление на строительном рынке новых видов строительных материалов на основе стекло- и углепластика ускорило решение этой задачи. Появился новый метод усиления железобетонных конструкций путем внешнего композитного армирования с использованием клеевых составов на основе эпоксидных смол.

Отдельные результаты исследования изгибаемых элементов, а затем и сжатых, усиленных стекло- и углепластиком появились сначала в Германии, а несколько позже в Японии [1,2].

В России активные исследования по использованию композитных материалов начались в самом начале 21 столетия. Начиная с 2006 года,

комплексные исследования инновационных материалов и технологий, связанных с усилением и восстановлением железобетонных конструкций, начались в лаборатории кафедры железобетонных и каменных конструкций РГСУ (в настоящее время это архитектурно-строительная Академия Донского государственного технического университета – ДГТУ).

Появились разработки по использованию и расчету высокопрочных бетонов [3-5], а также предложения о способах изготовления конструкций с переменным напряжением по длине элементов и другие новации [6-8].

Одновременно начались исследования по использованию композитных материалов в качестве внутренней рабочей арматуры для изгибаемых элементов при расчете по прочности [9,10] и деформативности [11-13], а также внешней рабочей арматуры для усиления нормальных и наклонных [14,15] сечений изгибаемых элементов.

Наибольшее число работ посвящено исследованиям сжатых железобетонных элементов, усиленных композитными материалами, у которых гибкость λ_h и соотношение размеров поперечного сечения превышает ограничения по расчёту, установленные Сводом Правил по усилению железобетонных конструкций композитными материалами.

Настоящая статья посвящена сопоставлению деформативности сжатых железобетонных элементов с гибкостью $\lambda_h=e_0/h=20$, усиленных различными вариантами внешнего поперечного, продольного и комбинированного композитного армирования.

Испытывались железобетонные стойки сечением 250x125(h) мм и длиной 2400мм, изготовленные из тяжелого бетона с проектным классом по прочности В30-35. Характеристики материалов, включая композитные, приведены в работе [16,17]. Продольное армирование всех стоек с вязаными каркасами было выполнено одинаковым и состояло из 4Ø12A500. Поперечные хомуты из проволочной арматуры Ø6B500 установлены с шагом

280 мм. Конструкция каркасов для стоек различной гибкости приведены в работе [18].

Все опытные образцы в зависимости от эксцентриситета приложения нагрузки (e_0) были разбиты на три серии. По серии «А» стойки испытывали с осевым эксцентриситетом приложения нагрузки $e_0=0$. В серии «Б» нагрузка прикладывалась при $e_0=2,0\text{см}$ ($0,16h$), а по серии «В» – при $e_0=4,0\text{см}$ ($0,32h$).

Опытные образцы имели 5 вариантов усиления. В поперечном направлении оно было выполнено в виде трехслойных замкнутых хомутов различной ширины и шага (варианты X_1 ; X_3 ; X_4), включая и полную обойму (X_5). Отдельные стойки имели продольное усиление в виде полос (ламината) шириной 50 мм и толщиной 1,4 мм, наклеенных на растянутых гранях. Продольное усиление выполнялось совместно с поперечными композитными хомутами. Методика усиления и испытания представлены в работе [19].

Характеристика всех опытных образцов, варианты их усиления композитными материалами, а также прочностные показатели стоек приведены в табл. 1.

Оценка деформативности всех опытных образцов при изменении уровня нагрузки и эксцентриситетов ее приложения для различных вариантов усиления, выполнена на основе сопоставления графиков изменения прогибов стоек (f). Эти графики представлены на рис.1-3. Они построены по результатам обработки показаний измерительных приборов (прогибомеров и индикаторов), установленных на образцах и занесенных в журналы испытаний (рис. 4).

Рассматривая указанные графики, и используя методику прямого сопоставления результатов эксперимента, можно отметить следующие:

- Во всём диапазоне нагрузок (от начала загрузки до этапа, предшествующего разрушению), предельные деформации эталонных стоек оказались, как правило, меньше по сравнению с деформациями усиленных

Таблица № 1

Характеристика и результаты испытания эталонных и усиленных углепластиком гибких стоек ($\lambda_n=20$) при эксцентриситетах приложения нагрузки $e_0=0; 2$ и 4 см.

Характеристика опытных образцов	Порядковый номер	Шифр стоек	Класс бетона B	Характеристика вариантов усиления	Опытные значения	
					Прочность kN $N_s; N_{s,f}$	Прогибы $f^{exp}, мм$
1	2	3	4	5	6	7
Осевой эксцентриситет $e_0=0$. Сечение-250x125 (h) мм $I_0=2400 мм^4$	17	АГ	30,6	Эталон	803,0	14,13
	18	АГУ-Х ₁	30,0	$b_f = 50 мм; s_f = 190 мм; s = 140 мм$	873,2	19,1
	19	АГУ-Х ₃	27,7	$b_f = 50 мм; s_f = 190 мм; s = 140 мм$ Хомут в центре $b_f = 250 мм$	900,0	12,7
	20	АГУ-Х ₅	27,7	$b_f = 1920 мм$ (Обойма по всей длине)	1080,0	9,62
Осевой эксцентриситет $e_0=2$ см. Сечение-250x125 (h) мм $I_0=2400 мм^4$	21	БГ	30,6	Эталон	410	20,5
	22	БГУ-Х ₁	30,0	$b_f = 50 мм; s_f = 190 мм; s = 140 мм$	400	15,2
	23	БГУ-Х ₃	31,2	$b_f = 50 мм; s_f = 190 мм; s = 140 мм$ Хомут в центре $b_f = 240 мм$	450	28,1
	24	БГУ-Х ₅	35,7	$b_f = 1920 мм$ (Обойма по всей длине)	510	15,5
	25	БГУ-Х _{3Lp}	31,2	$b_f = 50 мм; s_f = 190 мм; s = 140 мм$ хомут в центре $b_f = 240 мм$; 2-а углепламината: $b = 50 мм; t = 1,4 мм$	510	34,2
	26	БГУ-Х _{4Lp}	39,8	$b_f = 50 мм; s_f = 190 мм; s = 140 мм$; локальная обойма $b_f = 620 мм$; 2-а углепламината: $b = 50 мм; t = 1,4 мм$	714,5	24,7
Осевой эксцентриситет $e_0=4$ см. Сечение-250x125 (h) мм $I_0=2400 мм^4$	27	ВГ	35,2	Эталон	242,5	31,7
	28	ВГУ-Х ₃	35,2	$b_f = 50 мм; s_f = 190 мм; s = 140 мм$ Хомут в центре $b_f = 240 мм$	290,0	31,4
	29	ВГУ-Х ₅	30,1	$b_f = 1920 мм$ (Обойма по всей длине)	270	28,7
	30	ВГУ-Х _{3Lp}	35,7	$b_f = 50 мм; s_f = 190 мм; s = 140 мм$; локальная обойма $b_f = 240 мм$; 2-а углепламината: $b = 50 мм; t = 1,4 мм$	503,5	40,9
	31	ВГУ-Х _{4Lp}	39,8	$b_f = 50 мм; s_f = 190 мм; s = 140 мм$; локальная обойма $b_f = 620 мм$; 2-а углепламината: $b = 50 мм; t = 1,4 мм$	504,5	32,4

Примечание: В таблице 1 приняты следующие условные обозначения:
 b_f – ширина поперечных хомутов усиления или непрерывной обоймы; s_f – шаг поперечных хомутов между центрами их ширины; s – величина зазора между поперечными хомутами (шаг поперечных хомутов в свету).

образцов. Исключение из сказанного составляют отдельные усиленные образцы, у которых оказалась заведомо более низкая прочность бетона по сравнению с эталонными. При этом прочность всех без исключения усиленных стоек оказалась выше эталонных.

- Жесткость всех опытных образцов, усиленных только внешней поперечной либо продольной (в сочетании с конструктивной поперечной) композитной арматурой, оказалось выше по сравнению с эталонными образцами. Это имеет место во всем диапазоне нагрузок и проявляется в увеличении угла наклона всех кривых (по отношению к горизонтальной оси), характеризующих зависимость между величиной продольной нагрузки – N и

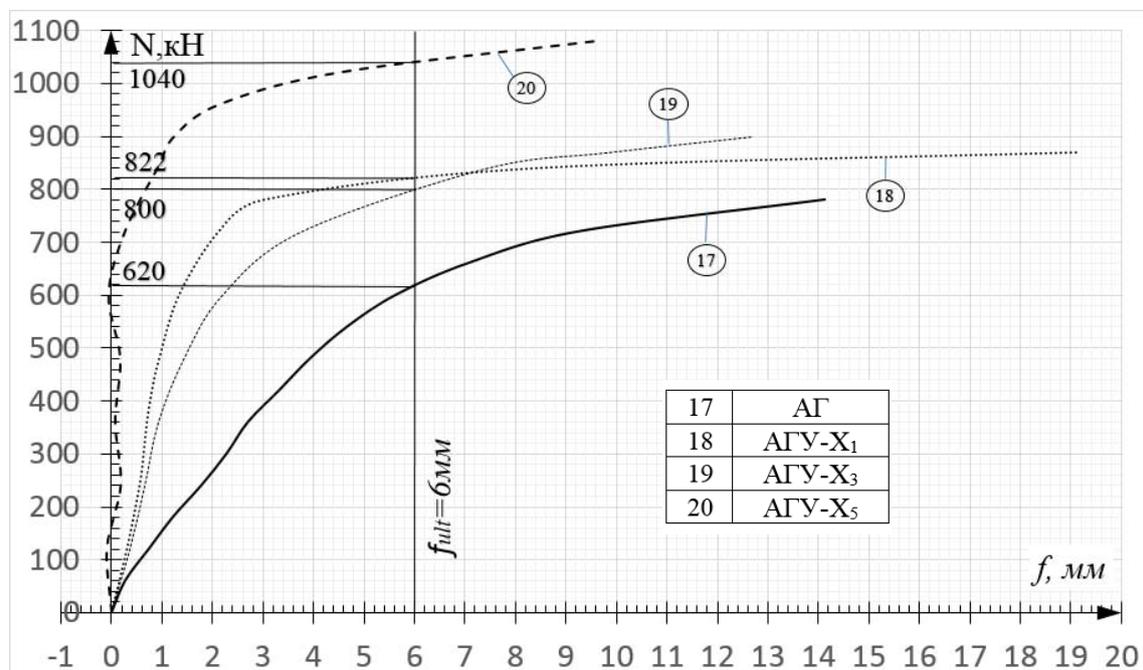


Рис. 1. Сопоставление опытных значений прогибов гибких ($\lambda_h=20$) стоек в зависимости от величины нагрузки и вариантов композитного усиления при осевом эксцентриситете $e_0=0$.

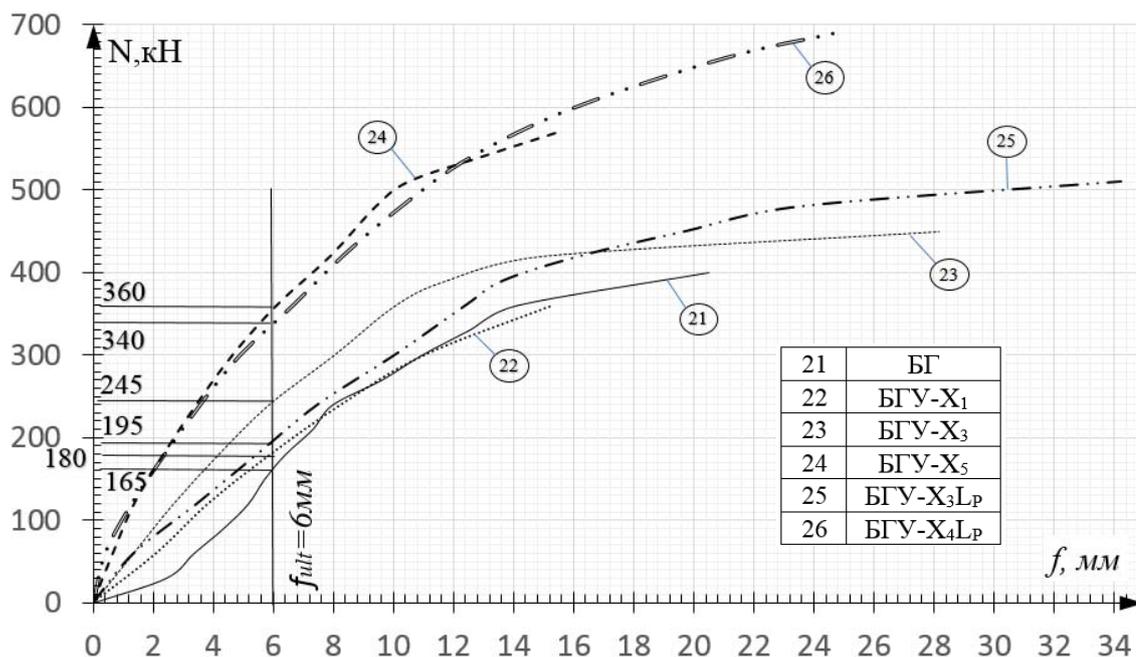


Рис. 2. Сопоставление опытных значений прогибов гибких ($\lambda_h=20$) стоек в зависимости от величины нагрузки и вариантов композитного усиления при осевом эксцентриситете $e_0=2,0\text{см}$ ($0,16h$).

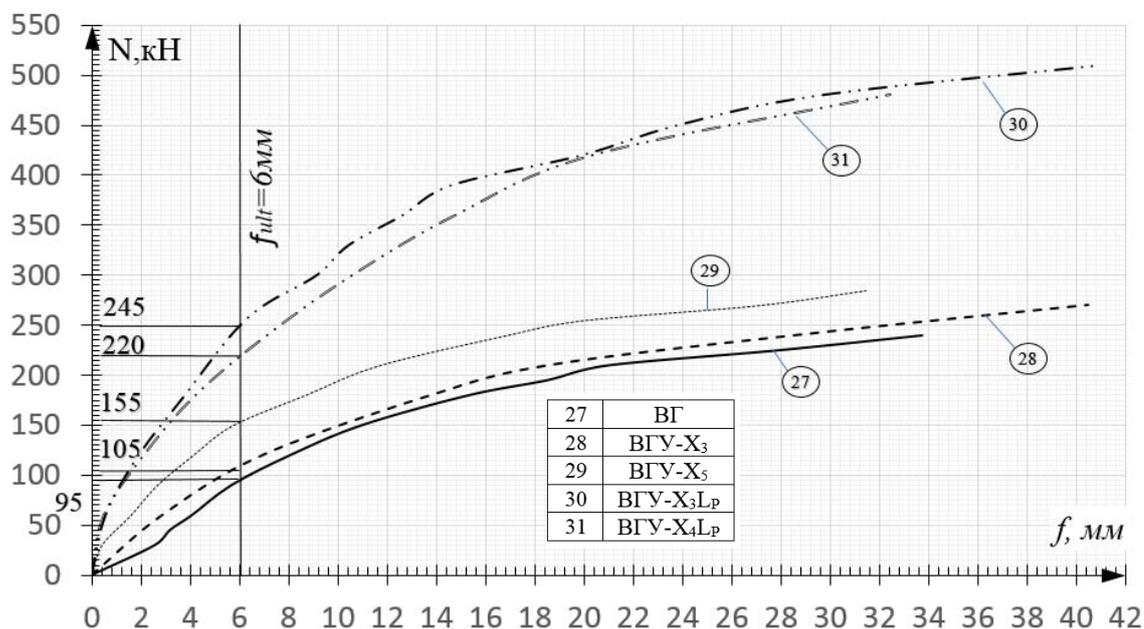


Рис. 3. Сопоставление опытных значений прогибов гибких ($\lambda_h=20$) стоек в зависимости от величины нагрузки и вариантов композитного усиления при осевом эксцентриситете $e_0=4,0\text{см}$ ($0,32h$).



прогибами – f . Следует отметить, также, что с увеличением жесткости самого варианта композитного усиления (хомуты X_3 , X_4 и обойма – X_5), увеличивается не только прочность и угол наклона кривых, но и предельная величина прогиба. Противоречий в этом нет, так как усиленные стойки имеют более высокую прочность, которая связана с увеличением прочности бетона, который работает при наличии поперечных хомутов в стесненных условиях.

-При увеличении эксцентриситета приложения нагрузки- e_0 , прочность стоек и углы наклона всех кривых (эталонных и усиленных) уменьшаются, а прогибы - f – увеличиваются.

-Опытные образцы при $e_0=0$ (рис. 1) имеют деформации, которые, для эталонных стоек характеризуются равномерно изменяющейся криволинейной зависимостью во всем диапазоне нагрузок. Это по-настоящему видимые прогибы, начиная уже с момента загрузки.

Рис. 4. Характер разрушения гибкой стойки БГУ- X_3 при величине $e_0=2,0$ см (0,16h).

В частности, если эталонные образцы величину **предельно допустимого прогиба** $f_{ult}=6\text{мм}$ достигают при уровне нагрузки, равном 0,76, то усиленные обоймой – только при уровне 0,94.

- При эксцентриситетах приложения нагрузки $e_0=2\text{см}$ и $e_0=4\text{см}$ (рис. 2 и 3) гибкие стойки сохраняют вышеуказанную закономерность изменения линии прогибов. Однако уровни нагрузок, при которых эталонные и усиленные образцы достигают значений предельно допустимых прогибов ($f_{ult}=6,0\text{мм}$), с увеличением эксцентриситета – уменьшаются.

- Важно отметить и то, что эффективность поперечного усиления несколько снижается в случае, когда хомуты наклеиваются на продольные полосы (ламинаты) внешнего усиления. Это объясняется, по-видимому, тем, что бетон имеет большую свободу деформаций в поперечном направлении в местах пересечения с внешней продольной и поперечной композитной арматурой. На наш взгляд, это происходит из-за менее плотного прилегания хомутов к бетону, а также из-за отсутствия полноценной адгезии между хомутами, выполненными из ткани и элементами продольного усиления – из полос, так как эти углепластики имеют разные клеевые составы при наклеивании, а, следовательно, и разные прочностные характеристики. Кроме того, необходимо на наш взгляд дополнительное нанесение высокопрочных ремонтных составов для устранения перепада высоты на пересечениях, продольных и поперечных элементов усиления.

С учетом вышеизложенного, следует отметить, что согласно нашим опытам, несмотря на большую гибкость опытных образцов ($\lambda_n=20$) и соотношение сторон стоек ($b/h=2,0$), которые превышают рекомендации действующего свода правил, композитное усиление позволяет резко увеличить не только прочность, но и жесткость сжатых элементов при разных значениях величины осевого эксцентриситета и $e_0=0$. Это указывает

на то, что Свод Правил по усилению железобетонных конструкций композитными материалами должен быть дополнен методикой расчета сжатых элементов, загруженных при малых эксцентриситетах ($0,1h \leq e_0 \leq 0,3h$). Это связано с тем, что указанный вид напряженно-деформированного состояния имеет место на нескольких этажах любого высотного каркасно-монолитного здания.

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 R. 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. Aksenov V.N., Quyen Vu Le, Trufanova E.V. Evaluation of Reinforced Concrete Cylindrical Reservoirs with Single-layered Walls, In Procedia Engineering // Procedia Engineering (ISSN 1877-7058), Vol. 150, 2016, pp. 1919-1925 URL: doi.org/10.1016/j.proeng.2016.07.192.
4. Belyaev A.V., Nesvetaev G.V., Mailyan D.R. Calculation of three-layer bent reinforced concrete elements considering fully transformed concrete deformation diagrams // MATEC Web of Conferences Editor V. Murgul. 2017. p. 04022. URL: doi.org/10.1051/matecconf/2017110604022.
5. Мкртчян А.М., Маилян Д.Р. Расчет железобетонных колонн из высокопрочного бетона по недеформированной схеме // Научное обозрение. 2013. № 11. С. 72-76.
6. Маилян Д.Р., Маилян Р.Л., Хуранов В.Х. Способы изготовления железобетонных конструкций с переменным преднапряжением по длине

элемента // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2004. № 5. С. 4-11.

7. Давидюк А.Н., Маилян Д.Р., Несветаев Г.В. Самоуплотняющиеся высокопрочные и легкие бетоны на пористых заполнителях для эффективных конструкций // Технологии бетонов. 2011. № 1-2. С. 57-59.

8. 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.

9. 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.

10. 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.

11. 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.

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

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

14. 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.

15. 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)

16. 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.

17. 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

18. 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.

19. 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. Aksenov V.N., Quyen Vu Le, Trufanova E.V. Procedia Engineering (ISSN 1877-7058), Vol. 150, 2016, pp. 1919-1925 URL: doi.org/10.1016/j.proeng.2016.07.192.
 4. Belyaev A.V., Nesvetaev G.V., Mailyan D.R. MATEC Web of Conferences Editor V. Murgul. 2017. P. 04022. URL: doi.org/10.1051/matecconf/201710604022.
 5. Mkrtchjan A.M., Mailjan D.R. Nauchnoe obozrenie. 2013. № 11. pp. 72-76.
 6. Mailjan D.R., Mailjan R.L., Huranov V.H. Izvestija vysshih uchebnykh zavedenij. Stroitel'stvo. 2004. № 5. pp. 4-11.
 7. Davidjuk A.N., Mailjan D.R., Nesvetaev G.V. Tehnologii betonov. 2011. № 1-2. pp. 57-59.
 8. 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. C. 012032.
 9. Pol'skoj P.P., Hishmah M., Mihub A. Nauchnoe obozrenie. 2012. № 6. pp. 211-213.
 10. Mailjan D.R., Pol'skoj P.P., Mervat H., Kurgin K.V. Inzhenernyj vestnik Dona (Rus), 2013, № 4. URL: ivdon.ru/magazine/archive/n4y2013/2096
 11. Mailjan D.R., Pol'skoj P.P., Mervat H., Kurgin K.V. Inzhenernyj vestnik Dona (Rus), 2013, № 4. URL: ivdon.ru/magazine/archive/n4y2013/2094
 12. Pol'skoj P.P., Mailjan D.R. Nauchnoe obozrenie. 2014. № 12. pp. 493-495.
 13. Mailjan D.R., Pol'skoj P.P. Nauchnoe obozrenie. 2014. № 12. pp. 490-492.
 14. Pol'skoj P. P., Mailjan D. R., Shilov A. A., Meretukov Z. A. Novye tehnologii. 2015. № 4. pp. 44-48.
 15. 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
-



16. Pol'skoj P.P., Georgiev S.V. Nauchnoe obozrenie, 2014, №10-3, pp. 662-666
17. Pol'skoj P.P., Georgiev S.V. Nauchnoe obozrenie, 2014, №10, ch.2. pp. 411-414
18. Mailjan D.R., Pol'skoj P.P., Georgiev S.V. Nauchnoe obozrenie. 2014. № 10-3. pp. 667-670.
19. Mailjan D.R., Pol'skoj P.P., Georgiev S.V. Nauchnoe obozrenie. 2014, №10, ch.2. pp. 415-418.