

## ИННОВАЦИОННЫЙ ВЫСОКОТЕХНОЛОГИЧНЫЙ МЕТОД УСИЛЕНИЯ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОЛОНН

*Д.Р. Маилян, С. В. Георгиев, А. И. Соловьёва, Н.О. Сизен*

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

**Аннотация:** В данной работе представлен новый способ усиления железобетонных колонн с использованием металла и композитного материала. Проведен анализ существующих традиционных и современных методов усиления железобетонных сжатых элементов и выявлены основные их недостатки, с учетом которых разработан новый способ усиления. В этом исследовании представлены результаты проверки эффективности нового метода усиления, расписаны по детально основные схемы, технология и порядок выполнения работ по усилению. Приведены результаты проведенных экспериментальных исследований. Выполнено сравнение прочности эталонных образцов с усиленными. Разработаны предложения по усилению железобетонных колонн металлическими элементами, расположенными в продольном направлении и композитными материалами, наклеенными в качестве хомутов с расположением волокон в поперечном направлении.

**Ключевые слова:** Сталь, железобетон, тяжелый бетон, испытание, стойка, композитный материал.

### Введение

Мировая практика показывает, что здания с железобетонными несущими конструкциями, построенные в прошлом веке, не всегда работают удовлетворительно в условиях современных экстремальных нагрузок [1]. Кроме того, использование некачественных материалов [2] или нарушения технологии изготовления и монтажа могут значительно влиять на конструктивные характеристики железобетонных элементов зданий.

В связи с этим были предложены различные методы повышения конструктивной способности и усиления существующих железобетонных конструкций [3]. В этом контексте рассматриваются железобетонные колонны, которые являются основными конструктивными элементами, обеспечивающими устойчивость, так как их обрушение может привести к разрушению всего несущего остова здания [4].

Существующие методы усиления железобетонных конструкций бетоном и сталью морально устарели [5], отличаются высокой

трудоемкостью работ, длительными сроками усиления и низкой эффективностью [6,7].

Современные методы усиления, основанные на использовании композитных материалов, показали высокую эффективность при усилении изгибаемых конструкций, однако в ряде случаев углепластиковые материалы оказываются неэффективными или нецелесообразными для других видов конструкций [8,9].

Наиболее наглядным примером является усиление железобетонных сжатых несущих конструкций зданий и сооружений композитными материалами [10-12]. Особенно это касается центрально сжатых железобетонных элементов с малой гибкостью [13-15].

Для усиления подобных конструкций используется метод устройства композитных обойм. При таком усилении прочность бетона на сжатие увеличивается путем сдерживая развития поперечных деформаций бетона композитной обоймой [16,17]. Данный вид усиления используется для увеличения прочности и деформативности коротких внецентренно сжатых стоек, при этом эффективность усиления достигается за счёт увеличения прочности бетона внутри композитной обоймы более чем на 200%. Однако большинство конструкций, используемых в строительстве, работают на внецентренное сжатие [18,19], а также имеют достаточно высокую гибкость. При таком характере работы несущих конструкций нецелесообразно устраивать железобетонные обоймы [20]. Вместо усиления композитными материалами в поперечном направлении используются специальные ламинаты или углеткани, наклеенные на растянутую зону железобетонных конструкций. Железобетонные колонны с большим эксцентриситетом приложения нагрузки работают по балочной схеме, в связи с чем увеличение прочности конструкций зависит не только от увеличения прочности

---

растянутой зоны, но и от увеличения несущей способности сжатой зоны бетона.

На сегодняшний день композитный материал остаётся одним из наиболее дорогих материалов для усиления железобетонных конструкций. Несмотря на это, учитывая его иные преимущества, использование его в растянутой зоне неоспоримо является наиболее эффективным методом усиления. В свою очередь, композитный материал, расположенный в сжатой зоне, может разрушиться преждевременно до разрушения сжатой зоны бетона, таким образом эффективность композитных материалов в этом случае сводится к нулю.

### **Объект исследования**

Вопросами решения проблем по усилению сжатых железобетонных конструкций композитными материалами занялись ученые кафедры ЖиКК ДГТУ. Анализируя известные исследования в данной области, было принято решение создать и исследовать новую систему усиления, которая основывается на совместном использовании композитных материалов и металлических уголков. Эффект усиления зависит от совместного включения в работу на сжатие металлических уголков, расположенных в сжатой зоне и композитных материалов, расположенных в поперечном направлении, при этом используется одна клеевая система как для металлических, так и для композитных материалов.

Основное преимущество данного вида усиления заключается в обеспечении совместной работы металлических уголков и композитных материал вплоть до разрушения опытных образцов.

В качестве металлической составляющей системы усиления выступают стальные уголки. При этом уголки либо скругляются путём обработки шлифовальной машинкой в местах будущего расположения композитных хомутов, либо используется гнутый профиль уголков. Композитный

---

материал, расположенный в поперечном направлении, наклеивается вокруг опытного образца в виде хомута.

Вследствие совместной работы металлических уголков и композитного материала, осуществляется одновременное увеличение несущей способности сжатой зоны колонны и прочности бетона на сжатие. Для обеспечения устойчивости металлических уголков важную роль играют композитные хомуты, установленные с равномерным конструктивным шагом вдоль всей железобетонной конструкции. Углепластиковые композитные хомуты выполняют сразу две роли.

Первая роль заключается в том, что хомуты обеспечивают устойчивость металлических уголков, а также являются анкерами для продольного металлического усиления.

Вторая роль заключается в том, что композитные хомуты обеспечивают сдерживание развития поперечных деформаций бетона, тем самым увеличивается жёсткость усиливаемой конструкции.

Для подтверждения эффективности композитного усиления при условии изменения поперечного сечения стоек была разработана программа экспериментальных исследований (рис.1), состоящая из 6 опытных образцов. Два образца изготавливались без усиления и являлись эталонными стойками. Четыре стойки изготавливались аналогично эталонным, однако отличались тем, что после бетонирования и набора нормативной прочности бетона производилось усиление разными сортаментами металлических уголков и композитными поперечными хомутами.

### **Методика усиления**

Усиление композитными материалами опытных образцов производилось по технологии, приведённой в СП 164.1325800.2014. Бетонные стойки обрабатывались шлифовальными машинами для придания ровной и шероховатой поверхности. Убирались все выступы, которые

---

образовались после бетонирования. В местах, где располагается стальное и композитное внешнее армирование производилось грунтование поверхности. После высыхания грунтовки наклеивались одновременно и металлические уголки и композитные хомуты. Металлические уголки наклеивались на специальную клеевую систему, которую используют при наклейке углеламинатов. Углеткань наклеивалась в виде хомутов в два слоя. В качестве материалов усиления использовалась углеткань КБ 900 фирмы ООО«Гидрозо».

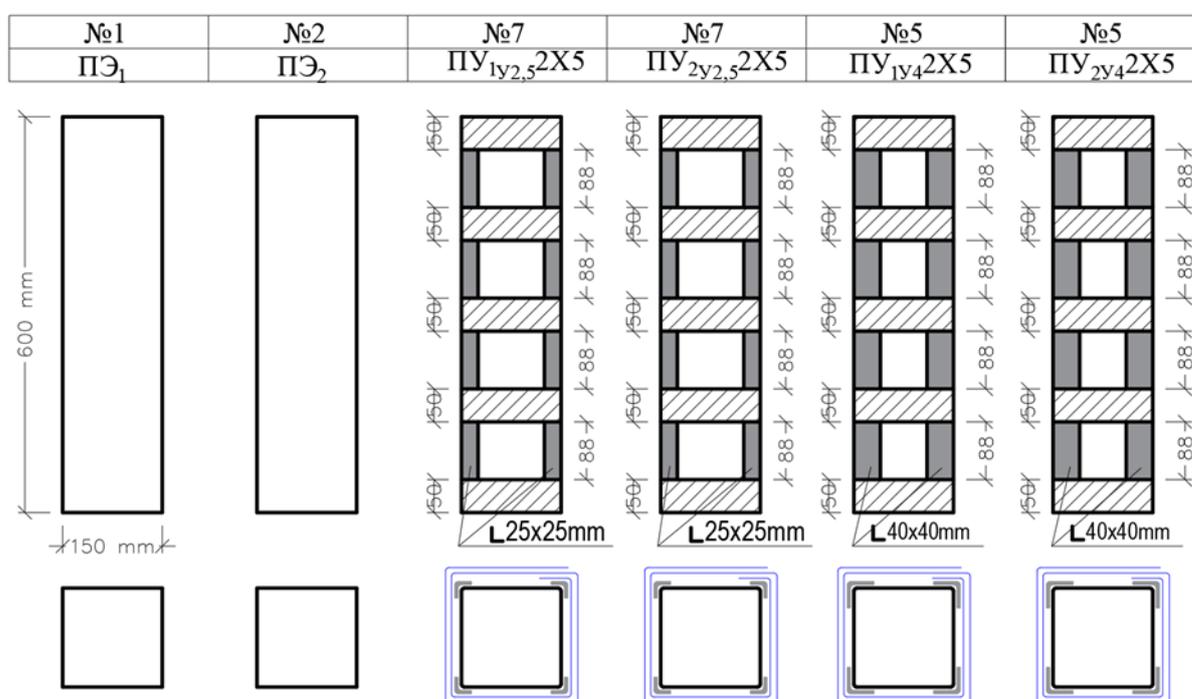


Рис.1. Программа эксперимента.

### Процедура испытания

Испытание проводилось на 250-тонном прессе (рис.2) в лаборатории кафедры железобетонных и каменных конструкций Донского государственного технического университета. Перед испытанием на опытные образцы устанавливались тензодатчики и индикаторы. Нагрузка передавалась при нулевом эксцентриситете, который обеспечивался и контролировался индикаторами, расположенными со всех четырех сторон

опытных образцов. Испытание производилось при ступенчато возрастающей нагрузке с выдержкой на каждом этапе не менее 10 минут. Количество шагов испытания зависело от несущей способности опытных образцов.



Рис. 2. Конструкция в стенде для испытания.

Каждый шаг нагружения не превышал одну десятую от максимальной расчётной несущей способности. Испытания производились вплоть до разрушения опытных образцов с целью определения опытных параметров и характера разрушения.

### **Результаты исследования и характер разрушения образцов**

Влияние вариантов усиления на характер разрушения (рис. 3) и поведение стоек под нагрузкой прослеживается следующим образом:

– Эталонная бетонная стойка ПЭ<sub>1</sub> - На этапе нагружения равном 360 кН наблюдался некоторый перепад деформаций и напряжений в сторону одного из углов конструкции. Образец разрушился в процессе выдержки (спустя 2-е минуты) после нагружения при  $N_{ult}=700$  кН. Характер разрушения классический.

- Эталонная бетонная стойка ПЭ<sub>2</sub> - перепад напряжений был замечен уже при 200 кН. Разрушение произошло при выдержке  $N_{ult}=702,5$  кН. Характер разрушения образца аналогичен предыдущему от диагональной наклонной трещины.
  - Стойка ПУ<sub>1 y2,5</sub>2x5 – железобетонная усиленная стойка до нагрузки 600 кН работала условно центрально сжато без влияния случайного эксцентриситета. При 600 кН был слышен характерный треск, вызванный активным деформированием композитных хомутов. На следующих этапах нагружения был замечен перепад напряжения на одну сторону конструкции. При нагрузке 800 кН усилился треск в композитных хомутах, при этом перепад напряжений в стойке стал еще больше. Разрушение произошло в процессе выдержки при 952,5 кН. Причиной разрушения стал разорванный верхний хомут, при этом металлический уголок выпучился и разрушилась сжатая зона бетона.
  - Стойка ПУ<sub>2 y2,5</sub>2x5 – разрушение произошло в процессе выдержки при 1095кН. Причиной разрушения стало выпучивание металлического уголка с последующим разрушением сжатой зоны бетона.
  - Стойка ПУ<sub>1 y4</sub>2x5 – влияние случайного эксцентриситета началось при 500 кН. При более высоких нагрузках конструкция всё больше работала как внецентренно сжатый элемент. Разрушение произошло при выдержке. Нагрузка резко упала от 1100 кН до 1062кН с последующим медленным падением до 850 кН. Видимого разрушения конструкции не имела, однако слышались потрескивания в композитных хомутах. Для определения характера разрушения опытного образца было принято решение снять все приборы и довести конструкцию до полного разрушения. После повторного нагружения нагрузка была поднята до 987,5 кН, после чего произошёл разрыв композитного хомута (второго сверху) с одновременным
-

выпучиванием металлических уголков и разрушением сжатой зоны бетона. Разрыв композита произошёл на углу усиливаемой колонны.

– Стойка ПУ<sub>2</sub> у<sub>4</sub>2х5 – опытный образец разрушился медленно при выдержке, после нагружения спустя 1,5 минуты. Предельная разрушающая нагрузка 1150,0кН т. В верхней части колонны слышал потрескивание в композитных хомутах, часть верхнего хомута порвалась на 1 см шириной. Испытание было закончена после резкого падения нагрузки на прессе до 750кН.

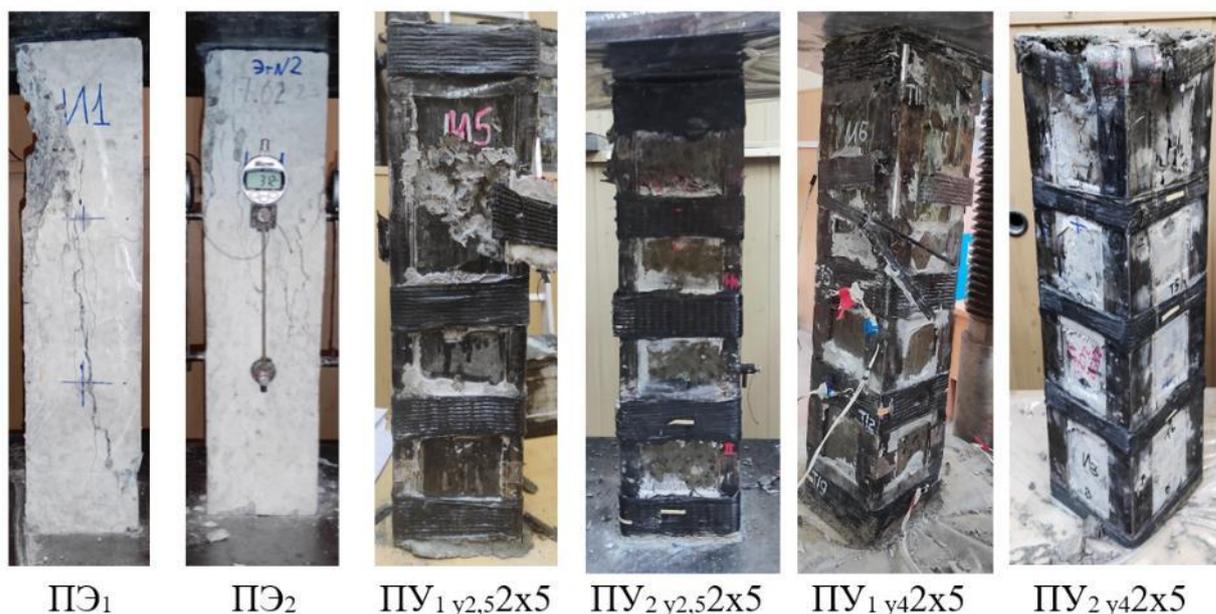


Рис.3. Характер разрушения опытных образцов.

Таблица № 1

Результаты испытания эталонных и усиленных стоек

№	Шифр стоек	Прочность бетона R <sub>ср</sub> , МПа	Прочность стоек, кН N <sub>s,ult</sub> , N <sub>f,ult</sub> кН		Коэффициент усиления при прямом сопоставлении k <sub>f</sub>	Коэффициент усиления, с учетом приведенной прочности k' <sub>f</sub>
1	2	3	4		5	6
1	ПЭ <sub>1</sub>	39,6	700	701,1	-	-
2	ПЭ <sub>2</sub>	39,6	702,5			
3	ПУ <sub>1</sub> у <sub>2,5</sub> 2х5	46,0	952,5	1083,8	1,54	1,33
4	ПУ <sub>2</sub> у <sub>2,5</sub> 2х5	46,0	1095,0			
5	ПУ <sub>1</sub> у <sub>4</sub> 2х5	44,6	1100,0	1125,0	1,60	1,42
6	ПУ <sub>2</sub> у <sub>4</sub> 2х5	44,6	1150,0			

## Выводы и рекомендации

Результаты экспериментальных исследований показали высокую эффективность совместной работы композитного и металлического усиления. Материалы усиления надежно и совместно работали с усиленными образцами вплоть до их разрушения. Было установлено что, несущая способность зависит от площади поперечного сечения металлического усиления. Стойки усиленные четырьмя равнобокими уголками с шириной 25 мм показали в среднем прирост прочности 54% и 33% при прямом сопоставлении и с учётом приведённой прочности бетона соответственно. При увеличении площади поперечного сечения металлического усиления, которое состоит из четырёх уголков шириной 40 мм, прирост прочности составил 60 и 42%, соответственно. Разрушение в основном происходило по причине разрыва композитных хомутов с дальнейшим выпучиванием продольно расположенных уголков и разрушением бетона сжатой зоны.

*\*\*Данная статья подготовлена в рамках гранта РФФИ (Соглашение № 24-29-00790), для выполнения научно-исследовательской работы «Новые технологии усиления железобетонных конструкций композитными материалами и методы их расчётной оценки».*

## Литература

1. Zhao, C.; Wang, K.; Xu, R.; Deng, K.; Cui, B. Development of fully prefabricated steel-UHPC composite deck system. J. Struct. Eng. 2019, 145, 04019051.
2. Vitek, J.L.; Coufal, R.; Citek, D. UHPC—development and testing on structural elements. Procedia Eng. 2013, 65, 218–223.
3. Wang, K.; Zhao, C.; Wu, B.; Deng, K.; Cui, B. Fully-scale test and analysis of fully dry-connected prefabricated steel-UHPC composite beam under hogging moments. Eng. Struct. 2019, 197, 109380.



4. Zhao, C.; Wang, K.; Zhou, Q.; Deng, K.; Cui, B. Full-scale test and simulation on flexural behavior of dovetail-shaped reactive powder–concrete wet joint in a composite deck system. *J. Bridge Eng.* 2018, 23, 04018051.
  5. Мареева О.В., Кловский А.В. Оценка эффективности способов усиления железобетонных колонн при реконструкции // *Природообустройство.* 2017. № 2. С. 33-41.
  6. Хаютин Ю.Г., Чернявский В.Л., Аксельрод Е.З. Ремонт и усиление железобетонных конструкций в зданиях из монолитного железобетона. // *Проектирование и строительство монолитных многоэтажных жилых и общественных зданий, мостов и тоннелей. Сборник докладов.* 2004 г., С. 195 -199
  7. Теряник В.В. Выбор способа усиления железобетонных колонн. *Наука - производству.* 2004. № 4. С. 66-67.
  8. Chajes M.J., Finch W.W., Januszka T.F. Bond and Force transfer of composite material plates bonded to concrete // *ACI Structural Journal.* 1999. V. 93, № 2. pp. 295-303.
  9. Chikh N., Gahmous M., Benzaid R. Structural Performance of High Strength Concrete Columns Confined with CFRP Sheets // *Proceedings of the World Congress on Engineering 2012 Vol III. WCE 2012, July 4-6, 2012, London, U.K.*
  10. Георгиев С.В., Меретуков З.А., Соловьёва А.И. К определению прочности бетона, обжатого композитными материалами, расположенными в поперечном направлении // *Инженерный вестник Дона.* 2021. № 10. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n10y2021/7225](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n10y2021/7225)
  11. Matthys S. Structural behavior and design of concrete members strengthened with externally bonded FRP reinforcement // *Doctoral thesis, Gent University,* 2000, С. 367.
-



12. Соловьёва А.И., Георгиев С.В., Меретуков З.А. Углеродное волокно - как хороший материал для усиления железобетонных конструкций // Инженерный вестник Дона. 2021. № 10. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n10y2021/7232](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n10y2021/7232)
  13. Chajes M.J., Finch W.W., Januszka T.F. Bond and Force transfer of composite material plates bonded to concrete // ACI Structural Journal. 1999. V. 93, № 2. pp. 295-303.
  14. Чернявский, В.А., Аксельрод Е.З. Усиление железобетонных конструкций композитными материалами // Жилищное строительство, 2003, № 3. С. 15-16.
  15. Георгиев С.В., Соловьёва А. И., Меретуков З.А. Сравнение методик усиления внешним армированием композитных материалов // Инженерный вестник Дона. 2022. №2. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2022/7485](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2022/7485)
  16. Георгиев С.В., Соловьёва А.И., Меретуков З.А. Сравнение методов усиления железобетонных стоек с точки зрения экономической эффективности // Инженерный вестник Дона. 2022. № 2. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2022/7485](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2022/7485)
  17. Mander J.B., Priestly Park R. Theoretical stress-strain model for confined concrete // ASCE Journal of Structural Engineering, Vol. 114 No. 8. 1988, pp. 1804-1826.
  18. Семенов Д.А. Эволюция нормативного подхода к расчету железобетонных элементов // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2017. № 5. С. 43-50.
  19. Маяцкая И.А., Польской П.П., Георгиев С.В., Федченко А.Е. Применение углепластиковых ламелей при усилении строительных конструкций // Строительство и техногенная безопасность. 2018. № 12 (64). С. 33-38.
  20. Теряник В.В., Бирюков А.Ю. Результаты экспериментальных исследований прочности и деформативности сжатых усиленных элементов
-

реконструируемых зданий // Вестник ЮУрГУ. Серия: Строительство и архитектура. 2009. №35 (168). URL: [cyberleninka.ru/article/n/rezultaty-eksperimentalnyh-issledovaniy-prochnosti-i-deformativnosti-szhatyh-usilennyh-elementov-rekonstruirovemyh-zdaniy/viewer](http://cyberleninka.ru/article/n/rezultaty-eksperimentalnyh-issledovaniy-prochnosti-i-deformativnosti-szhatyh-usilennyh-elementov-rekonstruirovemyh-zdaniy/viewer)

### References

1. Zhao, C.; Wang, K.; Xu, R.; Deng, K.; Cui, B. J. Struct. Eng. 2019, 145, 04019051.
2. Vitek, J.L.; Coufal, R.; Citek, D. Procedia Eng. 2013, 65, pp. 218–223.
3. Wang, K.; Zhao, C.; Wu, B.; Deng, K.; Cui, B. Eng. Struct. 2019, 197, 109380.
4. Zhao, C.; Wang, K.; Zhou, Q.; Deng, K.; Cui, B. J. Bridge Eng. 2018, 23, 04018051.
5. Mareeva O.V., Klovskij A.V. Prirodoobustrojstvo. 2017. № 2. pp. 33-41.
6. Hajutin Ju.G., Chernjavskij V.L., Aksel'rod E.Z. Proektirovanie i stroitel'stvo monolitnyh mnogojetazhnyh zhilyh i obshhestvennyh zdaniy, mostov i tonnelej. Sbornik dokladov. 2004 , pp. 195 -199
7. Terjanik V.V. Vybor sposoba usilenija zhelezobetonnyh kolonn. Nauka - proizvodstvu. 2004. № 4. pp. 66-67.
8. Chajes M.J., Finch W.W., Januszka T.F. ACI Structural Journal. 1999. V. 93, № 2. pp. 295-303.
9. Chikh N., Gahmous M., Benzaid R. Proceedings of the World Congress on Engineering 2012 Vol III. WCE 2012, July 4-6, 2012, London, U.K.
10. Georgiev S.V., Meretukov Z.A., Solov'jova A.I. Inzhenernyj vestnik Dona. 2021. № 10. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n10y2021/7225](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n10y2021/7225)
11. Matthys S. Doctoral thesis, Gent University, 2000, P. 367.
12. Solov'jova A.I., Georgiev S.V., Meretukov Z.A. Inzhenernyj vestnik Dona. 2021. № 10. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n10y2021/7232](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n10y2021/7232)
13. Chajes M.J., Finch W.W., Januszka T.F. ACI Structural Journal. 1999. V. 93, № 2. pp. 295-303.



14. Chernjavskij, V.A., Aksel'rod E.Z. Zhilishhnoe stroitel'stvo, 2003, № 3. pp. 15-16.
15. Georgiev S.V., Solov'eva A. I., Meretukov Z.A. Inzhenernyj vestnik Dona. 2022. №2. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2022/7485](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2022/7485)
16. Georgiev S.V., Solov'jova A.I., Meretukov Z.A. Inzenernyj vestnik Dona, 2022. № 2. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2022/7485](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2022/7485)
17. Mander J.B., Priestly Park R. ASCE Journal of Structural Engineering, Vol. 114 No. 8. 1988, pp. 1804-1826.
18. Semenov D.A. Stroitel'naja mehanika inzhenernyh konstrukcij i sooruzhenij. 2017. № 5. pp. 43-50.
19. Majackaja I.A., Pol'skoj P.P., Georgiev S.V., Fedchenko A.E. Stroitel'stvo i tehnogennaja bezopasnost'. 2018. № 12 (64). pp. 33-38.
20. Terjanik V.V., Birjukov A.Ju. Vestnik JuUrGU. Serija: Stroitel'stvo i arhitektura. 2009. №35 (168). URL: [cyberleninka.ru/article/n/rezultaty-eksperimentalnyh-issledovaniy-prochnosti-i-defo](http://cyberleninka.ru/article/n/rezultaty-eksperimentalnyh-issledovaniy-prochnosti-i-defo).

**Дата поступления: 14.10.2024**

**Дата публикации: 27.11.2024**