

## Моделирование усиления стальной обоймой колонны эстакады с учетом физической нелинейности

*О.В. Радайкин, Д.В. Нестеров*

*Казанский государственный энергетический университет*

**Аннотация:** В статье представлена конечно-элементная модель железобетонной колонны эстакады с усилением стальной обоймой. Она разработана в ВК «Ansys» с учётом нелинейности материалов и контактных взаимодействий между бетоном колонны и сталью обоймы. Дано обоснование примененных типов конечных элементов, законов деформирования материала и коэффициента трения. На основе численного моделирования выявлены три характерные стадии совместной работы колонны и обоймы в процессе нагружения. Особое внимание уделено анализу контактной поверхности и исследованию коэффициента трения «сталь-бетон». Этот фактор имеет значительное влияние на каждом из этапов нагружения и его изменение лежит в основе деления на стадии. На основе проведенных исследований выявлено, что учет совместной работы железобетонной колонны и стальной обоймы позволяет учесть резерв по несущей способности системы до 16 % по сравнению с раздельным их расчётом. В работе приведен анализ влияния шага стягивающих поперечных планок обоймы на несущую способность усиленной конструкции, установлены оптимальные границы его изменения.

**Ключевые слова:** физическая нелинейность, закон деформирования, стальная обойма, колонна технологической эстакады, коэффициент трения, усиление, конечно-элементная модель, железобетон, совместная работа, нелинейная деформационная модель.

### Введение

В настоящее время одной из актуальных задач в области строительства является обеспечение бесперебойной работы промышленных предприятий нашей страны, а также их расширение и реконструкция без остановок производства. Подобные задачи зачастую связаны с необходимостью усиления основных несущих конструкций технологических эстакад, поскольку они являются главной транспортной артерией, соединяющей цеха и разные предприятия в единую промышленную систему. Необходимость усиления возникает по нескольким причинам. С одной стороны, в связи с длительной эксплуатацией сооружения в вертикальных несущих элементах появляются чрезмерные деформации или повреждения различного происхождения, препятствующие нормальной работе. С другой стороны,

усиление может быть необходимо при увеличении нагрузок на существующие конструкции в ходе модернизации производства.

Одним из наиболее эффективных методов усиления, с точки зрения скорости монтажа является применение стальной обоймы из вертикальных прокатных уголков, стянутых поперечными планками. Об этом говорят исследования [1-3] и др. Эффективность данного метода усиления подтверждается также личным опытом проектирования и эксплуатации эстакад на объектах химической и нефтехимической промышленности Республики Татарстан.

На данный момент расчет усиления железобетонных колонн стальной обоймой выполняется с применением метода предельных усилий. Расчет ведется отдельно для обоймы и колонны без учета их совместной работы, что принимается как бы «в запас» и никак не контролируется. Такой подход не позволяет учитывать объемные деформации бетона, а также не реализует весь потенциал рассматриваемого типа усиления.

Выходом из данной ситуации является применение нелинейного компьютерного моделирования для расчета усиленных стальной обоймой колонн с учетом обжатия бетона и сил трения между колонной и обоймой.

### **Материалы и методы**

Для моделирования колонны с усилением используется БК «ANSYS», который позволяет выполнить расчет железобетонных конструкций с учетом нелинейности бетона и стали, а также учесть совместную работу элементов усиления и существующей конструкции.

Общая схема рассматриваемого типа усиления и принципиальное расположение контактных поверхностей показаны на рис. 1. Позицией 1 на нём обозначена контактная поверхность стальной обоймы, а позицией 2 – ответная контактная поверхность бетона.

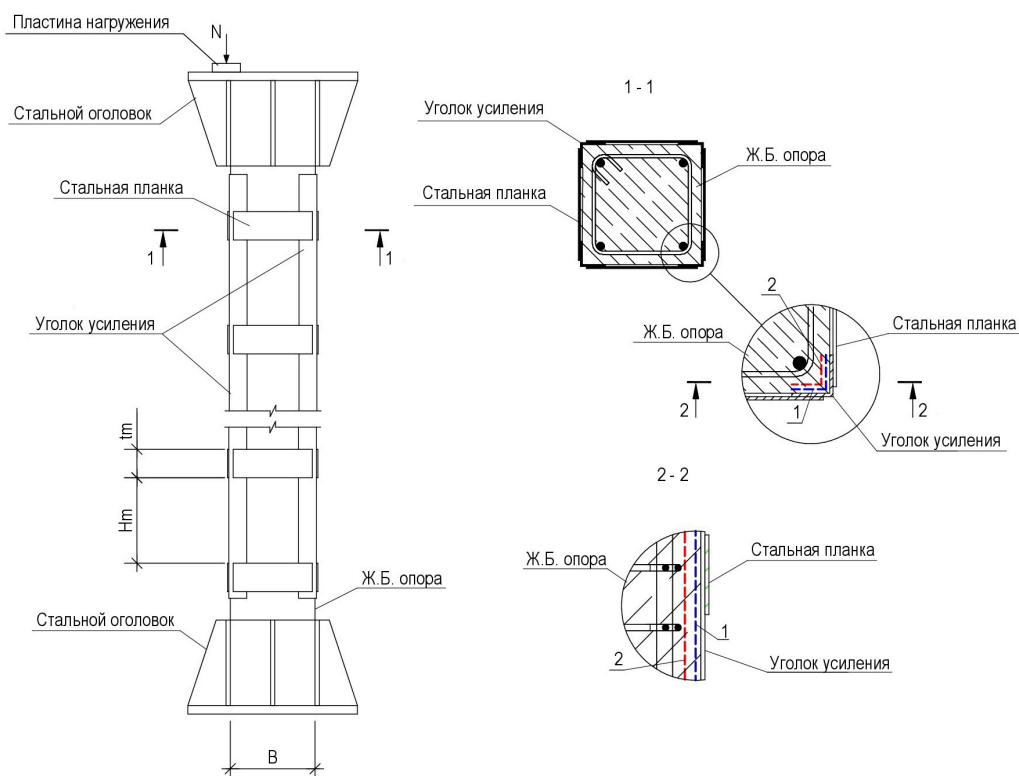


Рис. 1. – Общий вид колонны с усилением и принципиальная схема расположения контактных поверхностей.

В модели использован объемный конечный элемент бетона Solid/Concret 65 в соответствии с рекомендациями [4]. Помимо стандартных параметров этого КЭ, для описания свойств бетона, был задан его закон деформирования при осевом центральном сжатии и растяжении, предложенный д.т.н. Радайкиным О.В. [5, 6], который учитывает так называемую нисходящую ветку кривой деформирования бетона после достижения предела прочности и накопление повреждений.

Для моделирования арматуры колонны принят конечный элемент Beam 188, для которого задана двухлинейная зависимость « $\sigma$ - $\epsilon$ » Прандтля по СП 63.13330.2018.

Модель стальной обоймы усиления, показанная на рис. 2, построена на основе пластинчатого четырехузлового конечного элемента SHELL 181.

Применение объемного конечного элемента в данном случае является неуместным, поскольку для правильной его триангуляции по толщине стенки уголка потребуется большее количество элементов, что в свою очередь потребует больших вычислительных ресурсов для решения задачи. При моделировании нелинейности работы обоймы также принята нормативная зависимость Прандтля.

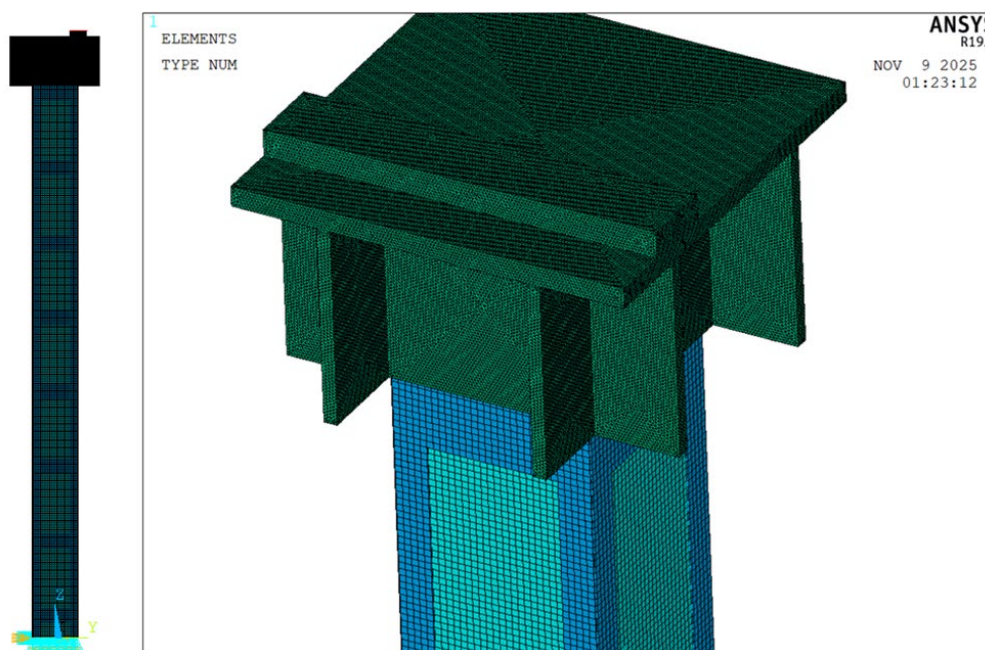


Рис. 2. – Конечно-элементная модель усиленной стальной обоймой колонны.

Вопрос по учету совместности работы бетона колонны и обоймы усиления решен при помощи конечных элементов контактных поверхностей TARGET 170 и CONTA 174. Эти элементы позволяют создать контакт материалов «сталь-бетон» с заданным коэффициентом трения, который может варьироваться от 0,342 до 0,630 в зависимости от шероховатости поверхностей, температуры окружающей среды и скорости скольжения [7]. В строительных нормах (пособии по проектированию отдельно стоящих опор и эстакад под технологические трубопроводы) принят средний коэффициент 0,5.

Модель колонны имеет габариты сечения 250×250 мм и высоту 4000 мм. Используется бетон класса В25. Продольная арматура принята 4Ø16

A500С. Поперечная арматура – Ø8 А240 с шагом 200 мм. Элементы усиления – равнополочные уголки 50×5 из стали класса С255, поперечные планки – из пластин 100×6 мм. Подбор сечения элементов при создании модели основывался на исследованиях [8, 9].

Нагрузка задавалась постепенно, шагами до момента проскальзывания (или местного разрушения бетона) по всей грани соприкосновения стальных уголковых профилей с бетоном. Она была приложена за пределами ядра сечения железобетонной колонны, что обеспечило возникновение деформаций и напряжений разного знака в её сечениях колонны.

### Результаты и обсуждения

В результате анализа напряженно-деформируемого состояния исследуемой модели была выявлена трёхстадийная работа усиленной конструкции (рис. 3):

- Первая стадия нагружения характеризуется совместной работой бетона и стальной обоймы в сжатой и растянутой зоне. На данном этапе передача напряжений от бетона к обойме обеспечивается за счет сил трения по всей плоскости уголковых профилей. Эта стадия заканчивается в момент, когда по грани соприкосновения уголков усиления и бетона начинают появляться местные участки проскальзывания и участки разрушения в растянутой зоне железобетонного элемента.

- На второй стадии нагружения участки проскальзывания увеличиваются вплоть до наступления третьей стадии – полного проскальзывания стальной обоймы по всем граням соприкосновения. Основная нагрузка перераспределяется на сжатый элемент обоймы. При этом совместная работа сжатой зоны бетона и сжатых элементов обоймы снижается незначительно, а в растянутой зоне проскальзывание более выражено.

– Третья стадия нагружения характеризуется полным проскальзыванием обоймы в растянутой зоне элемента по всем точкам соприкосновения с бетоном. Совместная работа обоймы и бетона прекращается. Этот момент примем за наступление предельного состояния.

В ходе анализа стадий нагружения установлено, что при вовлечении в совместную работу колонны и элементов усиления, несущая способность была в 1,72 раза больше, чем несущая способность колонны без усиления, рассчитанная в том же программном комплексе.

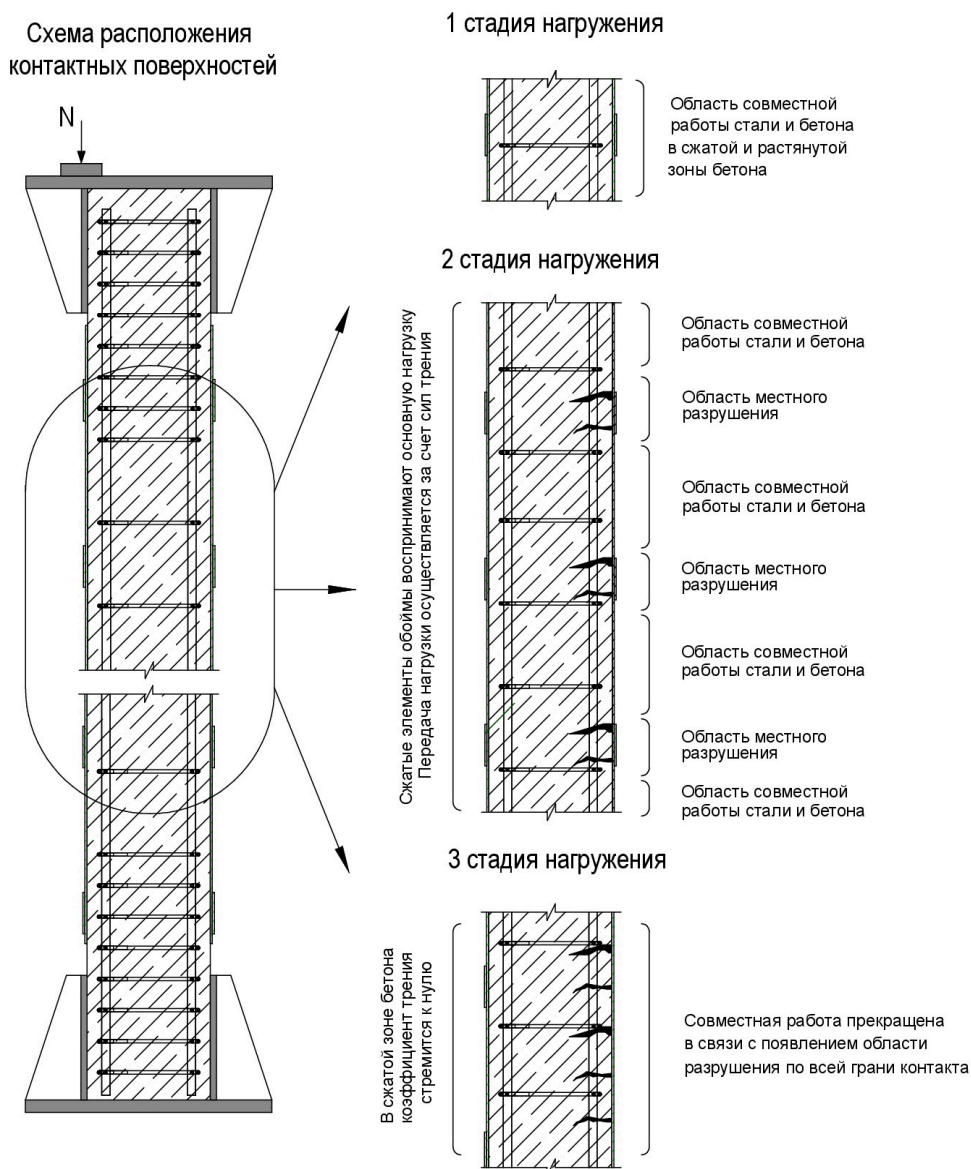


Рис. 3. – Стадии работы усиленной конструкции под нагрузкой.



Для определения эффективности сил обжатия, был выполнен дополнительный расчет аналогичной колонны уже без учета сил трения. Он проводился по принципу разделения несущей способности на две составляющие – предельная нагрузка на железобетонную колонну и предельная нагрузка на стальную обойму. Расчет не усиленной колонны и обоймы выполнялся в программном комплексе «Ansys» по аналогии с усиленной колонной. При моделировании использовались законы деформирования (соответствующие диаграммы деформирования) и рекомендации по расчету изложенные в монографии [10]. При моделировании тип материалов и конечных элементов не менялся.

При отдельном расчете обоймы передача нагрузки на элементы усиления производилась через модель жесткой пластины толщиной 100 мм, закрепленной сверху и снизу пространственной конструкции (рис. 4). При этом эксцентриситет остался неизменным, также как и схема нагружения конструкции.

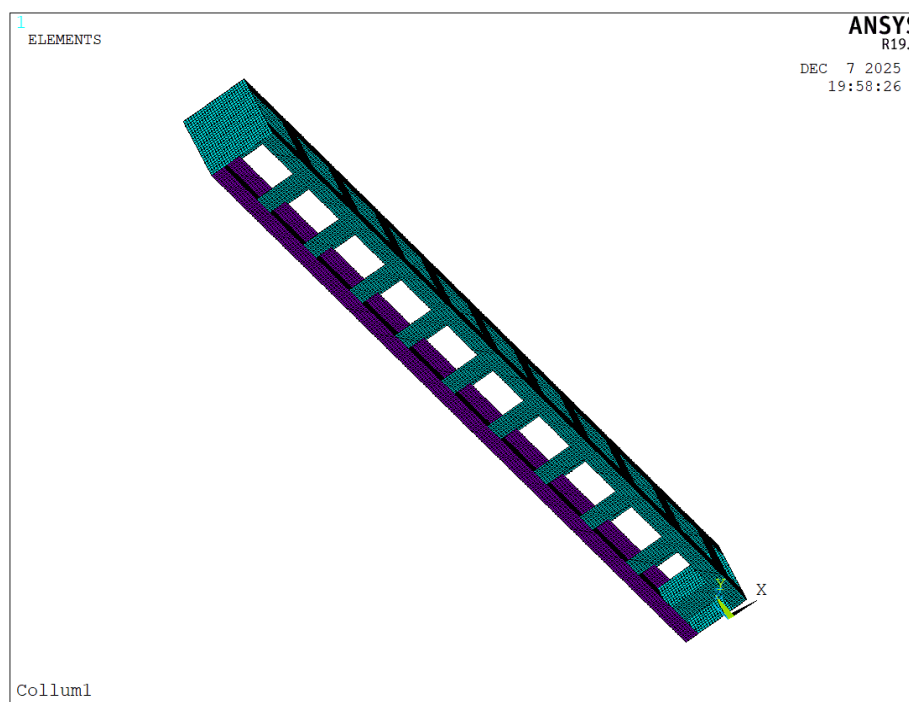


Рис. 4. – Конечно-элементная модель стальной обоймы.

В результате сравнения полученных данных установлено, что несущая способность усиленной колонны, рассчитанная с учетом совместной работы бетона и обоймы, оказалась выше примерно на 16% по сравнению с несущей способностью колонны, рассчитанной без учета этих сил совместной работы.

### Обсуждение

По результатам моделирования установлено значительное влияние шага планок на несущую способность колонны, усиленной стальной обоймой. Для подбора наиболее оптимального шага рассмотрено 7 КЭ-моделей с различными значениями этого параметра. Чтобы оценивать эффективность работы планок был введен безразмерный коэффициент шага  $S_c$ , который равен соотношению расстояния между гранями стягивающих планок  $H_m$  к ширине наибольшей грани поперечного сечения колонны  $h$ . Диапазон изменения коэффициента  $S_c$  составил от 0,8 до 1,4.

Было установлено, что слишком редкий шаг планок приводит к неравномерному обжатию тела колонны обоймой и в дальнейшем не позволяет контролировать степень обжатия колонны вертикальными уголками. В результате снижается несущая способность конструкции и процесс нагружения сразу начинается со второй стадии, что приводит к нерациональному использованию сечения. Слишком частый шаг планок приводит к перерасходу материалов. Наиболее оптимальный шаг по результатам исследования оказался при значениях  $S_c$  в пределах  $(0,9...1,2) \times h$ . Так для колонны с наиболее распространённым сечением  $400 \times 400$  оптимальный шаг планок равен 360...480 мм и составляет в среднем 420 мм.

### Заключение

Предложена в ВК «Ansys» конечно-элементная модель железобетонной колонны эстакады с усилением стальной обоймой. На языке APDL составлен

---



алгоритм численного расчёта на основе данной модели, в котором учитывается физическая нелинейность бетона и стали, а также совместная работа стальных элементов усиления и бетона колонны за счет сил трения.

По результатам моделирования принятого конструктивного решения было выявлено три стадии работы усиленной колонны под нагрузкой, различающихся по степени вовлечения в совместную работу элементов усиления и колонны.

Установлено, что несущая способность рассматриваемой конструкции с учетом совместной работы стальной обоймы и железобетонной колонны не менее, чем на 16 % выше по сравнению с отдельным расчётом этих элементов.

Также выявлено, что оптимальный шаг поперечных планок обоймы  $S_c$  лежит в пределах  $(0,9 \dots 1,2) \times h$ .

### Литература

1. Кунин Ю.С., Ермак А.Л., Григорян Г.А. Выбор оптимального метода усиления железобетонных колонн // Инженерный вестник Дона. 2025. №9. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n9y2025/10372/.
2. Георгиев С.В., Соловьева 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/.
3. Zhiwei Shan, Lijie Chen, Kun Liang, Ray Kai Leung Su, Zhaodong Xu Strengthening Design of RC Columns with Direct Fastening Steel Jackets // Applied Sciences. 2021. №11. URL: doi.org/10.3390/app11083649/.
4. Mahmoud F. B., Hatem M. M., Sherif A. M Behavior of reinforced concrete columns strengthened by steel jacket // HBRC Journal. 2015. V. 11. №2. pp. 201-212.

5. Радайкин О.В. Сравнительный анализ различных диаграмм деформирования бетона по критерию энергозатрат на деформирование и разрушение // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2019. №10. С. 29-39.

6. Радайкин О.В. К построению диаграмм деформирования бетона при одноосном кратковременном растяжении/сжатии с применением деформационного критерия повреждаемости // Вестник гражданских инженеров. 2017. №6. С. 71-78.

7. Васылев В. Н., Миронов А. Н., Анищенков В. М., Игнатенко Д. Р. Экспериментальные исследования совместной работы стального элемента и бетона по поверхности их соприкосновения // Металлические конструкции. 2022. Т. 28. №3. С. 155-165.

8. Islam N., Hoque M. M. Strengthening of Reinforced Concrete Columns by Steel Jacketing: A State of Review // Asian Transactions on Engineering. 2015. V. 05. №3. pp. 6-14.

9. Семенюк С.Д., Мельянцова И.И., Башкиров В.В. Методика экспериментальных исследований сжатых железобетонных элементов, усиленных стальной обоймой // Вестник Белорусско-Российского университета. 2013. Т. 39. №2. С. 171-177.

10. Карпенко Н.И., Соколов Б.С., Радайкин О.В. Проектирование бетонных, железобетонных, каменных и армокаменных элементов и конструкций с применением диаграммных методов расчёта: монография. М: Издательство АСВ, 2019. 194 с.

### References

1. Kunin YU.S., Yermak A.L., Grigoryan G.A. Inzhenernyy vestnik Dona. 2025. №9. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n9y2025/10372/](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n9y2025/10372/).

2. Georgiyev S.V., Solov'yeva A.I., Meretukov Z.A. Inzhenernyy vestnik Dona. 2022. №2. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2022/7485/](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2022/7485/).

3. Zhiwei Shan, Lijie Chen, Kun Liang, Ray Kai Leung Su, Zhaodong Xu. Applied Sciences. 2021. №11. URL: doi.org/10.3390/app11083649/.
4. Mahmoud F. B., Hatem M. M., Sherif A. M. HBRC Journal. 2015. V. 11. №2. pp. 201-212.
5. Radaykin O.V. Vestnik BGTU im. V.G. Shukhova. 2019. №10. pp. 29-39.
6. Radaykin O.V. Vestnik grazhdanskikh inzhenerov. 2017. №6. pp. 71-78.
7. Vasylev V. N., Mironov A. N., Anishchenkov V. M., Ignatenko D. R. Metallicheskiye konstruktsii. 2022. V. 28. №3. pp. 155-165.
8. Islam N., Hoque M. M. Asian Transactions on Engineering. 2015. V. 05. №3. pp. 6-14.
9. Semenyuk S.D., Mel'yantsova I.I., Bashkirov V.V. Vestnik Belorussko-Rossiyskogo universiteta. 2013. V. 39. №2. pp. 171-177.
10. Karpenko N.I., Sokolov B.S., Radaykin O.V. Proyektirovaniye betonnykh, zhelezobetonnykh, kamennykh i armokamennykh elementov i konstruktsiy s primeneniye diagrammnykh metodov rascheta [Design of concrete, reinforced concrete, masonry, and reinforced masonry elements and structures using stress-strain diagram methods]: monografiya. Moskva. 2019. 194 p.

**Авторы согласны на обработку и хранение персональных данных.**

**Дата поступления: 19.12.2025**

**Дата публикации: 7.02.2026**