

## Расчет конструкций усиления колонн (металлической обоймой из уголков) с учётом физической нелинейности в программном комплексе

*Ю.С. Кунин, А.Л. Ермак*

*Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ); г. Москва, Россия*

**Аннотация:** В статье представлен расчет усиления железобетонных колонн с помощью металлической обоймы из уголков, учитывающий физическую нелинейность материалов в рамках программного комплекса Лира САПР. Использование нелинейного подхода обусловлено неспособностью линейных методов адекватно отразить реальное поведение бетона и стали под нагрузкой, в частности, их разрушение и постепенную потерю жесткости. В данной работе представлена модель, учитывающая нелинейные жесткостные характеристики бетона и стали в соответствии с нормативными документами. Учёт физической нелинейности материалов при расчёте усиления колонн критически важен для достоверного моделирования поведения конструкции и предотвращения недооценки рисков разрушения. Необходимо проверять конструкцию на местные разрушения на каждом этапе нагружения для обеспечения достоверности расчетов и безопасности конструкции. Использование специализированного программного обеспечения с возможностью поэтапного нагружения и проверки на местные разрушения позволяет получить точные результаты и обосновать оптимальные конструктивные решения.

**Ключевые слова:** колонны, железобетон, сталь, усиление, обойма, расчет, физическая нелинейность, программный комплекс, напряжения, деформации.

### Введение

В течение жизненного цикла здания и сооружения могут менять свое назначение (например, преобразование зала торгового помещения в зал общественного питания или переоборудование промышленного здания в культурный центр). Изменение функционального назначения зданий требует проверки их конструктивных решений на новые нагрузки, особые условия эксплуатации, вызванные новыми технологическими процессами [1, 2]. Изменение характера приложения нагрузок, а в некоторых случаях и их увеличение, может существенно повлиять на перераспределение усилий в элементах строительных конструкций здания, что делает актуальным вопрос о проведении детального анализа несущей способности, как отдельных конструктивных элементов, так и всего здания в целом.

---

Безопасность и эксплуатационная надежность строительных конструкций будет обеспечена при детальном выполнении диагностики, обследования и поверочных расчетов с учетом всех новых обстоятельств работы конструкций. Во многих случаях требуется выполнение усиления строительных конструкций, что должно быть подтверждено специальными расчетами в программных комплексах. Рассмотрим один из распространенных методов усиления железобетонных конструкций металлической обоймой из уголков.

Требования действующих норм по учету физической нелинейности конструкций содержится в следующих документах: Федеральный закон РФ №384-ФЗ «Технический регламент о безопасности зданий и сооружений» и ГОСТ 27751-2014 Надежность строительных конструкций и оснований. В нормативно правовом поле Российской Федерации, а именно в статье 16, п. 4 Федерального закона РФ №384-ФЗ, учет геометрической и физической нелинейности при использовании расчетные модели имеет обязательный характер. В основополагающем документе в части расчета бетонных и железобетонных конструкций п. 5.1.2 СП 63.13330.2018 «Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения» указано, что расчет конструкций ... по предельным состояниям ... производят ... с учетом физической нелинейности. В п. 6.2.4 - 6.2.7 (СП 430.1325800.2018 «Монолитные конструктивные системы. Правила проектирования») указано что расчет монолитных конструктивных систем производят с применением линейных и нелинейных жесткостей железобетонных элементов, а также упоминается, что распределение усилий в элементах монолитной конструктивной системы зависит не от значения, а, в основном, от соотношения жесткостей этих элементов.

## Материалы и методы

Актуальность исследования обусловлена возрастающей необходимостью повышения точности и надежности расчетов усиления существующих железобетонных конструкций. Традиционные линейные методы расчета неадекватно отражают реальное поведение материалов (бетона и стали) под нагрузкой, особенно вблизи предельных состояний, игнорируя такие явления, как образование трещин, пластические деформации и постепенная потеря жесткости. Это может приводить к занижению несущей способности и недооценке рисков разрушения. Поэтому, разработка и применение методики расчета с учетом физической нелинейности материалов является важной задачей для обеспечения безопасности и долговечности реконструируемых зданий и сооружений. Выбор усиления колонн металлической обоймой из уголков обусловлен распространенностью данного метода в Российской и зарубежной практике строительного проектирования [3 - 6].

В работе был использован метод численного моделирования с применением программного комплекса Лира-САПР. Выбор Лира-САПР обусловлен его широким использованием в практике проектирования, наличием необходимых функций для нелинейного анализа, соответствием российским нормативным документам и удобством интерфейса.

## Результаты исследования

Рассматриваемый объект - здание торгового назначения, переоборудованное для целей общественного питания с увеличением нагрузок на кровлю при установке специального технологического оборудования.

Здание - одноэтажное прямоугольной формы в плане. Габариты в осях составляют 22,93x16,6 м, высота этажа – 4,85 м.

---

Конструктивная схема здания – монолитный железобетонный каркас, состоящий из монолитных железобетонных колонн, объединенных между собой монолитными балками и плитой покрытия, жестко сопряженных между собой и образующих единую пространственную конструкцию. Пространственная жесткость каркаса обеспечена жестким защемлением вертикальных конструкций в монолитный плитный фундамент и жестким диском в уровне покрытия. Монолитные колонны выполнены сечениями 400x400 мм и установлены с шагом  $\sim 5,000 \times 5,220$  м. Максимальный пролет составляет 8,200 м. Конструкция покрытия представляет собой плоскую плиту толщиной 200 мм, выполненную по монолитным балкам сечением 400x300( $h$ ) мм, соединяющим колонны вдоль цифровых осей.

Было выполнено обследование здания с проведением вскрытий и установлено действительное армирование колонн, балок и плиты. Определены фактические прочностные характеристики бетона всех элементов конструкций. Выявлены дефекты бетонирования: каверны, раковины, локальные участки недоуплотненного бетона на нижней поверхности плит и балок. Обнаружены «нормальные трещины» на нижней поверхности балок шириной раскрытия до 0,3 мм, а также трещины в плите перекрытия шириной до 0,3 мм на нижней пролётной зоне и верхней опирной.

Задача выполнения расчета – анализ несущей способности конструкций вследствие изменения назначения здания и увеличения нагрузок на кровлю.

После выполнения расчет в первом приближении с помощью условных понижающих коэффициентов жесткости материалов согласно пункту п. 6.2.5 - п.6.2.7 СП 430.1325800.2018, а также с помощью инструмента «Типы заданного армирования» задаем фактическое армирование элементов. По результатам расчета проанализированы полученные значения усилий (рис. 1), а также коэффициенты запаса армирования для стержней (проверка по прочности) и для элементов с недостаточным армированием подобрана

---

необходимая площадь уголков усиления (рис. 2). Далее для самого нагруженного элемента воспользуемся инструментом «Информация об элементе» и экспортируем усилия в программу «Конструктор сечений» по кнопке «Экспорт усилий».

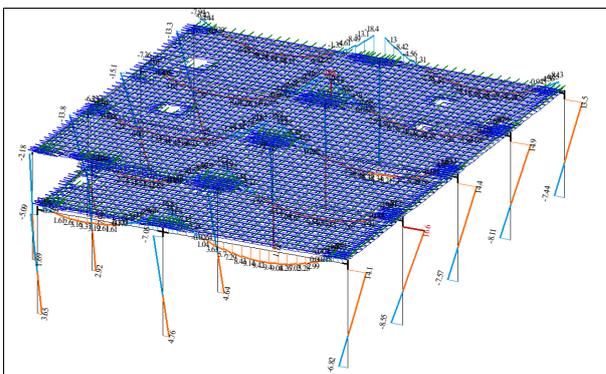


Рис. 1. Эпюры  $M_u$  для стержневых элементов.

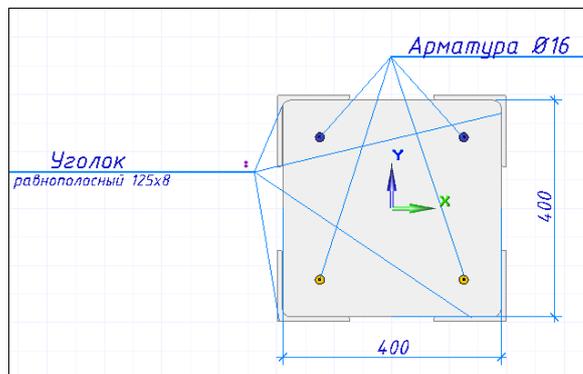


Рис. 2. Смоделированное сечение в «Конструкторе сечений ЛИРА-САПР».

Далее в «Конструкторе сечений ЛИРА-САПР» необходимо задаться фактическим армированием железобетонной колонны, в соответствии с проведенным обследованием и назначить нелинейные характеристики материалов во вкладке «Материал» для бетона В25, арматуры А400, а также для стальных уголков С245.

Для уточнения значений нелинейных жесткостей конструктивных элементов, учитывающих армирование, согласно проведенному обследованию здания, с учётом образования трещин и развитием неупругих деформаций в бетоне и арматуре, воспользуемся возможностями «Конструкторе сечений ЛИРА-САПР». Значения для построения диаграмм сжимающих напряжений бетона в зависимости от относительных деформаций вычисляется согласно пунктам 6.1.20- 6.1.27 по СП 63.13330.2018 «Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения». В программном комплексе данная диаграмма соответствует 14 кусочно-линейному закону деформирования (рис. 3). Значения зависят от класса бетона по прочности на сжатие, продолжительности действия

нагрузок, относительной влажности воздуха окружающей среды и в зависимости от группы расчета по предельным состояниям [7-10].

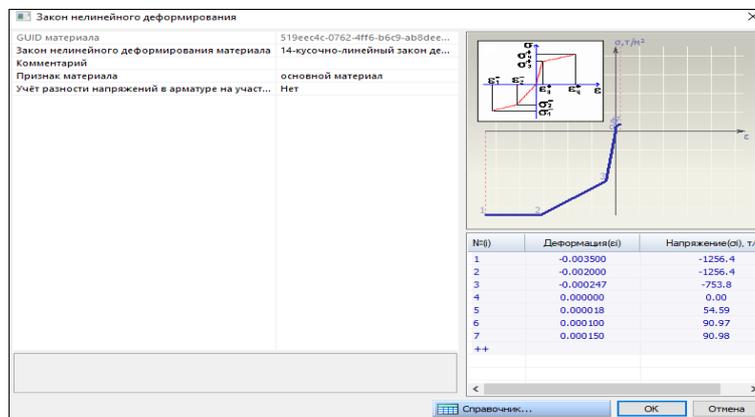


Рис. 3. Диаграмма деформирования бетона классом В25 при действии всех нагрузок, включая кратковременные, при высоте сброса бетона свыше 1,5 м при бетонировании колонн.

Показатели для построения диаграмм сжимающих напряжений арматуры в зависимости от относительных деформаций вычисляется согласно пунктам п 6.2.13- 6.2.15 по СП 63.13330.2018 «Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения». Значения зависят от класса арматуры и от группы расчета по предельным состояниям.

Для построения диаграмм сжимающих напряжений стали С245 в зависимости от относительных деформаций вычисляется согласно приложению В СП 16.13330.2017 «Стальные конструкции» таблица В.9. В программном комплексе данная диаграмма можно задать 14 кусочно-линейному закону деформирования. Значения зависят от толщины фасонного проката.

В программном комплексе рассчитано сечение с отображением напряжений в конкретном элементе конструкции, а также установлена зона трещинообразования в бетоне при заданной нагрузке (рис. 4). После

завершения расчета необходимо проверить, что в процессе поэтапного нагружения не происходит разрушение элементов.

На следующем этапе расчёта, для того чтобы ветви стальной обоймы включились в работу с основной конструкцией, рекомендуется обеспечить максимальную разгрузку усиливаемой конструкции. Важным фактором включения конструкций усиления в работу является соблюдение рекомендаций по их монтажу согласно п. 2.60-2.64 (Рекомендации по проектированию усиления железобетонных конструкций зданий и сооружений реконструируемых предприятий. Надземные конструкции и сооружения. Харьковский Промстройинипроект, НИИЖБ Госстроя СССР. Москва: Стройиздат, 1992).

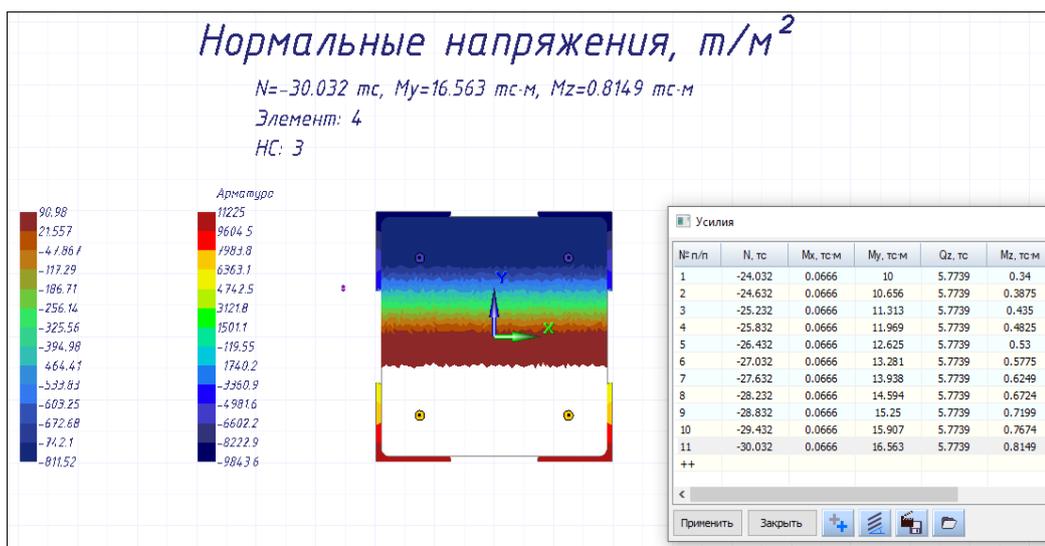


Рис. 4. Нормальные напряжения в сечении усиленной колонны.

## Выводы

1. Основным отличием линейного одноэтапного расчета усиления от расчета усиления с нелинейными жесткостными характеристиками материала является невозможность моделирования действительной работы элемента конструкции, а также неспособность выключения из работы других элементов, в которых действующие напряжения превышают расчетное сопротивление материала.

2. Необходимо при моделировании железобетонной колонны с усилением стальной обоймой корректно «настроить» параметры нелинейной жесткости материалов для каждого элемента.

3. Обязательным фактором после завершения расчётов является проверка наличия разрушения сечения в процессе поэтапного нагружения.

4. Современные расчетные программы позволяют получить необходимую информацию для принятия оптимальных конструктивных решений. Для выбранной задачи расчета достаточно функционала таких программ как ЛИРА-САПР, Scad и отдельного ПО «StructureHelper» для расчета сложных сечений. Важным критерием в вопросе выбора программного комплекса для данного расчета является удобность и интуитивность работы в нем, а также соответствие российским нормам с чем хорошо справляется выбранный программный комплекс

### Литература

1. Жиленко О.Б., Ниметуллаева У.М. Адаптация существующих зданий к новой функции// Строительство и техногенная безопасность. 2021. № 2(73). С. 17 – 26.
2. Майборода Д. В. Реновация промышленных территорий // Вестник науки. 2019. №6 (15). С. 239-241.
3. Мареева О. В., Кловский А. В. Оценка эффективности способов усиления железобетонных колонн при реконструкции // Природообустройство. 2017. №2. С. 33-41.
4. Мосин М.В. Оценка эффекта и эффективности усиления металлическими уголковыми обоймами усиления железобетонных колонн с возможностью обжатия // Вестник СибАДИ. 2017. № 2 (54). С. 112-119.

5. Sen, D., Begum, M. Experimental Investigation on the Behavior of Steel Angle and Strip Jacketed RC Column Under Eccentric Loading // J. Inst. Eng. India Ser. 2024. Vol. 105. Pp.77–89.
6. Khalifa, E.S., Al-Tersawy, S.H. Experimental and analytical behavior of strengthened reinforced concrete columns with steel angles and strips // Int J Adv Struct Eng 6. 2014. Vol. 6.
7. 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.
8. Карпенко Н.И., Радайкин О.В. К совершенствованию диаграмм деформирования бетона для определения момента трещинообразования и разрушающего момента в изгибаемых железобетонных элементах // Строительство и реконструкция. 2012. №3(41). С. 10–17.
9. Панасюк Л.Н., Таржиманов Э.А., Чантха Хо. Моделирование работы сооружений с учетом проявления неравномерных деформаций в основании // Инженерный вестник Дона, 2011, №4. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2011/591](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2011/591)
10. 10. Польской П.П., Георгиев С.В. Вопросы исследования сжатых железобетонных элементов, усиленных различными видами композитных материалов // Инженерный вестник Дона, 2013, №4. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2013/2134](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2013/2134)

### References

1. Zhilenko O.B., Nimetullaeva U.M. Stroitel'stvo i texnogennaya bezopasnost'. 2021. № 2(73). pp. 17 – 26.
  2. Majboroda D. V. Vestnik nauki. 2019. №6 (15). pp. 239-241.
  3. Mareeva O. V., Klovskij A. V. Prirodoobustrojstvo. 2017. №2. pp. 33-41.
  4. Mosin M.V. Vestnik SibADI. 2017. № 2 (54). pp. 112-119.
  5. Sen, D., Begum, M. J. Inst. Eng. India Ser. 2024. Vol. 105. pp.77–89.
-



6. Khalifa, E.S., Al-Tersawy, S.H. Int J Adv Struct Eng 6. 2014. Vol. 6.
7. Radajkin O.V. Vestnik BGTU im. V.G. Shuxova. 2019. № 10. pp. 29–39.
8. Karpenko N.I., Radajkin O.V. Stroitel'stvo i rekonstrukciya. 2012. №3 (41). pp. 10–17.
9. Panasyuk L.N., Tarzhimanov E.A., Chantha Ho. Inzhenernyj vestnik Dona. 2011. №4. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2011/591](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2011/591)
10. Pol'skoj P.P., Georgiev S.V. Inzhenernyj vestnik Dona. 2013. №4. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2013/2134](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2013/2134).

**Дата поступления: 9.12.2024**

**Дата публикации: 10.01.2025**