Сравнительный анализ существующих типов усиления железобетонных стоек технологических эстакад

Нестеров Дмитрий Владимирович
аспирант, Казанский государственный энергетический университет, NDVnest@yandex.ru

Проведён анализ известных конструктивных решений усиления железобетонных стоек опор технологических эстакад. Рассмотрены три типа усиления: стальная, железобетонная и композитная обойма. На конкретном примере выполнено технико-экономическое сравнение этих типов по критериям стоимостных затрат на материалы и на монтаж. Самым эффективным оказался вариант со стальной обоймой. Однако ее эффективность обеспечивается только за счет совместной работы стальных элементов с бетоном стойки за счёт создания предварительного напряжения. Научной новизной данной статьи является применение нелинейной деформационной модели для расчета железобетонного элемента и учет сил трения на границе стыка бетона колонны и обоймы усиления. При этом для оценки несущей способности предполагается построение конечно-элементной модели в вычислительном комплексе Ansys APDL Mechanical. Применение такой модели позволяет увеличить эффективность рассматриваемого типа усиления до 17% по сравнению с нормативными подходами при расчете прочности, что подтверждается данными исследованиями.

Ключевые слова: стальная обойма, нелинейная деформационная модель, метод конечных элементов, диаграммы деформирования, физическая нелинейность.

Введение

На промышленных объектах нашей страны железобетон нашёл самое широкое распространение. Благодаря высокому сопротивлению сжимающим усилиям, повышенной огневой и коррозионной стойкости, а также другим высоким эксплуатационным качествам этот композитный материал широко применяют, в частности, для изготовления вертикальных стоек разного рода технологических эстакад. Часто такие эстакады эксплуатируются под открытым небом, испытывают воздействия агрессивных сред, непроектные статические и динамические нагрузки, что влечёт за собой накопление повреждений в материале. Нередко эксплуатационная нагрузка на стойки увеличивается вслед за модернизацией технологического процесса на данном производстве. Эти и другие факторы вызывают необходимость в усилении железобетонных колонн (стоек) эстакад [1]. На сегодня известно несколько способов усиления рассматриваемых конструкций, таких как подведение новых дополнительных (дублирующих) стоек и изменение конструктивной схемы, выполнение обойм из различных материалов о них и пойдет речь далее.

Материалы и методы

Для увеличения несущей способности колонн технологических эстакад необходимо выбрать наиболее подходящую для данного типа сооружений схему усиления [2]. Выбор такой схемы будет производиться по критериям материалоемкости, трудоемкости изготовления и трудоемкости монтажа данного конструктивного решения. Для наиболее полного анализа будем рассматривать три основные схемы усиления, такие как железобетонная, стальная и композитная обойма.

При выборе материалов усиления будем руководствоваться применяемостью того или иного типа усиления для технологических эстакад. Особенностью эксплуатации таких сооружений как эстакады является огнестойкость конструкции, сроки монтажа типа усиления, сезонность выполнения работ по усилению и др. Далее рассмотрим более подробно каждый тип усиления.

Для усиления железобетонной обоймой применяется стандартная продольная и поперечная арматура по ГОСТ 34028-2016. Арматура железобетонного элемента и стержни проектируемой обоймы между собой не связываются. Толщина железобетонной обоймы вертикального элемента зависит от состояния существующей стойки и как правило не превышает 300 мм. Минимальная же толщина обойм зависит от метода бетонирования. Например, при применении глубинных вибраторов толщина стенки обоймы зависит от высоты опалубки. Так при высоте опалубки 600-800 мм толщина составит 80 мм, а при высоте опалубочных конструкций 1200 мм толщина уже составит не менее 120 мм. При данном типе усиления возможно применение торкрет бетонов, что позволяет уменьшить толщину слоя до 50 мм.

При применении железобетонных обойм площадь поперечного сечения арматуры определяется в соответствии с расчетом. При этом минимальный диаметр сжатого стержня не может быть менее 16 мм, а для растянутого стержня 12 мм. При усилении железобетонной обоймой поперечная арматура может быть принята сварной (минимальный диаметр 8 мм) или вязанной (минимальный диаметр 6 мм). Шаг поперечной арматуры устанавливается не менее 15 диаметров основной продольной арматуры, но не более 200 мм. Также шаг не может превышать трехкратную толщину обоймы.[4]

Рассмотрим конструктивные особенности стальной обоймы. Составными частями усиления такой обоймы являются уголковые профиля, которые устанавливаются по граням железобетонных стоек. Сечение профиля определяется исходя из прочностного расчета, сортамента металлопроката и наличия материала на производственных базах. Из практики проектирования минимальное конструктивное сечение принимается не менее чем из уголка размерами 75х6, однако при расчетном обосновании может быть принято и меньшее сечение. Для соединения данных стальных элементов применяются соединительные планки. Размеры планок принимаются по расчету. Согласно конструктивным требованиям к данным элементам, толщина планки не может быть менее 8 мм, ширина планки принимается по расчету, и варьируется от 50 мм до 200 мм.

При устройстве металлических обойм главным условием, для работы данного типа усиления является примыкание металлических элементов к граням усиливаемых элементов. Также важна их вертикальность. Для обеспечения этих условий поверхность бетона выравнивают и ремонтируют специальными составами.[4] Включение стальной обоймы в работу осуществляется различными способами, а именно при помощи специальных приспособлений или путем нагрева соединительных планок. Также может быть выполнено усиление без специальных приспособлений, однако это экономически нецелесообразно в связи с отсутствием совместной работы бетона и элементами обоймы [3].

Металлические обоймы как правило применяют, когда требуется не увеличивать габариты вертикальных элементов, либо при необходимости выполнения усиления в кратчайшие сроки. Следует отметить, что стальные кон-

струкции требуется защищать от пожара, так как огнестойкость таких конструкций для промышленных сооружений транспортирующих ЛВЖ и ГЖ недостаточна. Этот вопрос решается путем доведении стальных элементов до требуемой огнестойкости специальными составами [6].

Следующий, относительно новый тип усиления, это композитная обойма. На данный момент существует методика усиления колонн специальными композитными составами. Оно выполняется по принципу оклеивания граней бетонных элементов углеволокном. Углеволокно представляет собой прочный гибкий материал, свернутый в рулоны. Процесс монтажа имеет четкую последовательность. Сначала поверхность вертикального элемента очищается от пыли и грязи специальными составами. Затем на бетонную поверхность наносят клеевой полимерный состав и приклеивают к бетону углеволокно. Далее процесс повторяется, а клей наносится на волокно образуя многослойную обойму. На данный момент на рынке существует множество композитных полотен и полимерных клеевых составов различных марок и характеристик. Их подбор осуществляется по методике расчета в соответствии с СП 164.1325800.2014.

Несмотря на простоту использования и легкость материалов, при выполнении усиления возникает ряд вопросов. Во-первых, полимерный состав многокомпонентный и несоблюдение соотношений клеевых компонентов приведет либо к «недобору» прочности при застывании, либо к его «хрупкости». Соответственно это повлияет на несущую способность элемента. Во-вторых, все композитные клеи и составы имеют длительный срок схватывания и набора прочности. Также следует отметить необходимость выполнения защиты от УФ-излучения так как данное воздействие ведет к деградации материала. При применении такого типа усиления следует детально проработать вопрос огнестойкости композитных ламелей [5].

Результаты и обсуждения

Рассматривая все типы усиления железобетонных вертикальных элементов, можно сделать вывод, о том, что каждый из них имеет ряд преимуществ и недостатков. Однако выбор конкретного типа усиления всегда основывается на двух требованиях. Первое требование – это техническая возможность применения выбранного типа усиления. Второе требование – экономическая целесообразность. Для сравнения методов усиления был проведен сравнительный анализ различных видов обойм. Для оценки экономической эффективности была принята конструктивная схема эстакады, показанная на рис. 1.

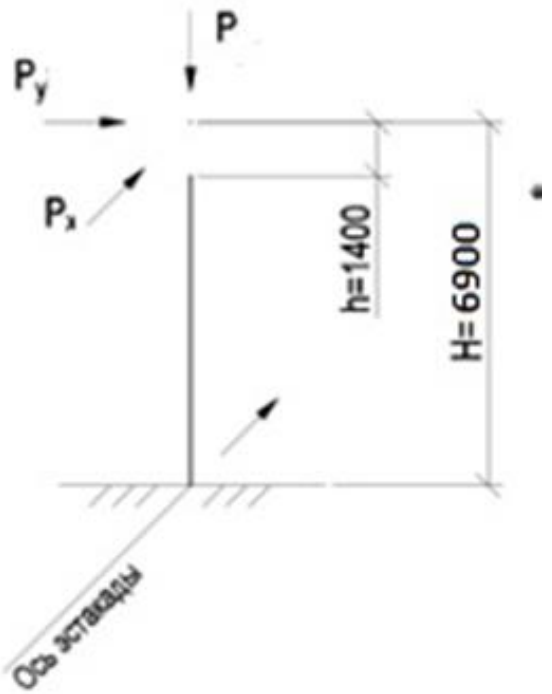


Рис.1 Габаритная схема эстакады

Колонна имеет сечение 400х400, и выполнена из бетона В15. Продольное армирование колонны принято из 4-ех стержней диаметром 18 мм класса AIII, а поперечная арматура из стержней диаметром 8 мм класса AI с шагом 300 мм. Высота колонны 5,5 м. Максимально-допустимая вертикальная нагрузка P по Серии 3.016.1-11 на стойку при данном сечении 90 кН, поперечные силы Px=9,2 кН и Py=1 кН.

Для изучения экономической целесообразности усиления будем сравнивать три варианта перегрузки строительных конструкций. Сначала нагрузка на стойку будет увеличится в 1,25 раза, затем в 1,5 и 2 раза соответственно. (См. таблицу 1)

Таблица 1

Нагрузки на конструкции, подлежащие усилению

Раздел оценки Перегрузка конструкций	Нагрузки на колонну эстакады		
	P	Px	Py
1,25 P	112,5 кН	11,25 кН	1,25 кН
1.5 P	135 кН	13,8 кН	1,5 кН
2 P	180 кН	18,4 кН	2 кН

Поперечные силы будем увеличивать пропорционально увеличению вертикальной нагрузки. Стальная обойма рассчитывалась в двух вариантах.

В первом варианте стальная обойма рассчитывалась на основе МКЭ расчета с учетом совместной работы стальной обоймы и бетона существующей конструкции а также с применением диаграмм деформирования. Необходимость учета физической нелинейности подтверждает автор [7]. Модель построена в программном комплексе Ansys APDL Mechanical. Бетон существующей колонны моделировался конечным элементом SOLID 65. Такой конечный элемент позволяет учитывать диаграммы деформирования бетона из исследований [8, 9]. Для моделирования стальной обоймы использовался пластинчатый конечный элемент SHELL 181. Эффект обоймы обеспечивался за счет объемных деформаций бетона колонны. Контактные поверхности между уголковыми профилями и бетоном обоймы моделировалась за счет конечных элементов контактных поверхностей TARGET 170 и CONTA 174. Коэффициент трения принимался равным 0,5.

Во втором варианте использовался нормативный подход на основе метода предельных усилий. Полученные результаты показаны на графике, показанном ниже (см. рис. 2).

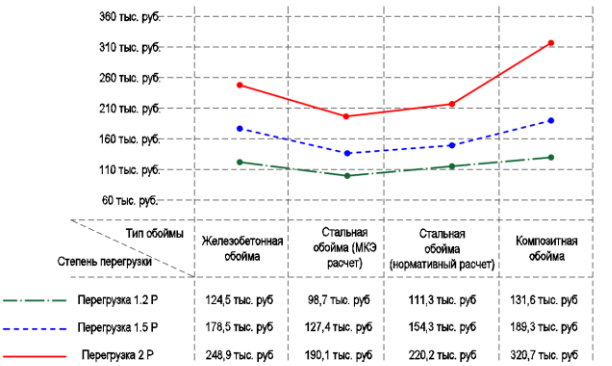


Рис.2 График сравнения стоимости обойм.

Выполненный анализ экономической эффективности рассмотренных типов усиления позволяет сказать о наличии существенных различий в стоимости. Все три метода усиления демонстрируют рост стоимости в зависимости от увеличения нагрузки. Для начала рассмотрим все три варианта без учета возможного расчета конструкции усиления с применением МКЭ. Наиболее экономически-эффективным решением при этом с учетом разной степени перегрузки является применение усиления стальной обоймой. При минимальной перегрузке стоимость такой обоймы составит 111,3 тыс. руб., что на 10.6% дешевле железобетонной и на 15,4% дешевле композитной обоймы. Если рассматривать перегрузку, равную 2P, преимущество стальной обоймы становится более выраженным и ее стоимость становится на 11,5 % ниже железобетонной обоймы и на 31,4 % ниже композитной. Это объясняется сравнительно невысокой стоимостью металлопроката, монтажных работ стальных конструкций и высокой скоростью монтажа. Однако наиболее эффективным решением будет выполнение МКЭ расчета с учетом диаграмм деформирования бетона и совместности работы обоймы с усиляемой железобетонной колонной. При этом применение диаграмм зависимости напряжений от деформаций и учет совместной работы позволит сократить стоимость усиления стальной обоймой в среднем на 12-17 % в сравнении с нормативным подходом.

Обсуждение

Сравнивая различные методы усиления следует использовать перспективные методики расчета. Тогда экономическая эффективность стальной обоймы станет более выраженной. В этом можно убедиться используя при расчете прочности нелинейную деформационную модель. Также следует не забывать об учете сил трения на границе соприкосновения уголковых профилей усиления и бетона колонны.

Для сравнительного анализа применялось конечно-элементное моделирование обоймы усиления в программном комплексе Ansys APDL Mechanical. Полученная модель позволила сократить расход материала по сравнению с расходом материала на конструкции, рассчитанные по нормативным подходам. При использовании в расчетах диаграмм деформирования эффективность усиления стальной обоймой может увеличиваться на 17 % по сравнению с показателями указанными на графике выше (Рис. 2) Модель на,

которой были достигнуты такие показатели, построена на основе исследований [10] и учитывает физическую нелинейность материала и совместную работу уголковых профилей усиления и железобетонной колонны.

Заключение

В рамках исследования проведен анализ трех основных методов усиления железобетонных колонн технологических эстакад: железобетонной, стальной и композитной обойм. Также рассмотрены конструктивные особенности каждого метода усиления, нормативные требования к монтажу и проектированию, а также выявлены ключевые преимущества и ограничения исследуемых методов усиления.

На основании выполненного сравнительного анализа при различных уровнях перегрузки строительных конструкций (1,25P, 1,5P и 2P) было выявлено, что наиболее эффективным методом усиления для промышленных технологических эстакад является стальная обойма. Этот метод экономическую эффективность во всех рассмотренных вариантах перегрузки колонн эстакад. Например при минимальной перегрузке в 1.25 раза стоимость стальной обоймы на 10,6% ниже железобетонной. Если сравнивать ее с композитной обоймой она будет выгоднее на 15,4%. При максимальной перегрузке (2P) эффективность стальной обоймы возрастает до 11,5% и 31,4% соответственно.

Экономическая эффективность стальной обоймы обеспечивается сравнительно невысокой стоимостью стального проката, высокой скоростью монтажа, а также применением современных методов расчета с использованием нелинейной деформационной модели и конечно-элементного моделирования.

Литература

1. Мосин М. В. Оценка эффекта и эффективности усиления металлическими уголковыми обоймами усиления железобетонных колонн с возможностью обжатия // Вестник СибАДИ. 2017. №2. С. 112–119.
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
3. Опанасюк И.Л., Данилов С.В. Исследование способов усиления железобетонных колонн с использованием многокритериального анализа оценочных показателей // Вестник Белорусско-Российского университета 2011. С.157-163
4. Онуфриев Н. М. Усиление железобетонных конструкций промышленных зданий и сооружений. Ленинград: Стройиздат, 1965. 342 с.
5. Кунин Ю.С., Ермак А.Л., Григорян Г.А. Выбор оптимального метода усиления железобетонных колонн // Инженерный вестник Дона. 2025. №9
6. Данилов С. В., Семененко Е. В. Усиление железобетонных колонн стальными обоймами без обетонирования // Белорусско-Российский университет. Могилев, Беларусь, 2024. [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://e.biblio.bru.by/bitstream/handle/1212121212/41725/236-237.pdf?sequence=1&isAllowed=y (дата обращения: 09.09.2026).
7. Кунин Ю. С., Ермак А. Л. Расчет конструкций усиления колонн (металлической обоймой из уголков) с учётом физической нелинейности в программном комплексе // Инженерный вестник Дона Т. 1. 2025.
8. 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.
9. 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.
10. Радайкин О.В., Нестеров Д.В. Моделирование усиления стальной обоймой колонны эстакады с учетом физической нелинейности //Инженерный вестник дона № 2. 2026

Comparative analysis of existing types of reinforcement for reinforced concrete supports of technological overpasses

Nesterov D.V.
Kazan State Power Engineering University

JEL classification: L61, L74, R53

An analysis was conducted of the known design solutions for reinforcing reinforced concrete supports of technological overpasses. Three types of reinforcement were considered: steel, reinforced concrete, and composite sheaths. Using a specific example, a technical and economic comparison of these types was carried out based on the criteria of material and installation costs. The most effective option turned out to be the one with a steel sheath. However, its effectiveness is ensured only through the joint operation of steel elements with the concrete of the support, achieved by creating pre-stress. The scientific novelty of this article lies in the application of a nonlinear deformation model to calculate a reinforced concrete element and take into account the friction forces at the interface between the column's concrete and the reinforcement casing. To assess the load-bearing capacity, it is proposed to build a finite-element model in the Ansys APDL Mechanical computational package. Using such a model makes it possible to increase the efficiency of the considered type of reinforcement by up to 17 % compared to standard approaches in strength calculations, which is confirmed by the research data.

Keywords: steel casing, nonlinear deformation model, finite element method, stress-strain diagrams, physical nonlinearity.

References

1. Mosin M. V. Ocenka ehffekta i ehffektivnosti usileniya metallicheskimi ugolkovymi obojmami usileniya zhelezobetonnyh kolonn s vozmozhnost'yu obzhatiya // Vestnik SibADI. 2017. №2. Pp. 112–119.
2. Georgiev S.V., Solov'eva A.I., Meretukov Z.A. Sravnenie metodov usileniya zhelezobetonnyh stoek s tochki zreniya ehkonomicheskoj ehffektivnosti // Inzhenernyj vestnik Dona. 2022. №2
3. Opanasyuk I.L., Danilov S.V. Issledovanie sposobov usileniya zhelezobetonnyh kolonn s ispol'zovaniem mnogokriterial'nogo analiza ocenochnyh pokazatelej // Vestnik Belorussko-Rossijskogo universiteta 2011. Pp.157-163
4. Onufriev N. M. Usilenie zhelezobetonnyh konstrukcij promyshlennyh zdanij i sooruzhenij. Leningrad: Strojizdat, 1965. 342 p.
5. Kunin Yu.S., Ermak A.L., Grigoryan G.A.. Vybor optimal'nogo metoda usileniya zhelezobetonnyh kolonn // Inzhenernyj vestnik Dona. 2025. №9
6. Danilov S. V., Semenenko E. V. Usilenie zhelezobetonnyh kolonn stal'nymi obojmami bez obetonirovaniya // Belorussko-Rossijskij universitet. Mogilev, Belarus', 2024. [Electronic resource]. Rezhim dostupa: http://e.biblio.bru.by/bitstream/handle/1212121212/41725/236-237.pdf?sequence=1&isAllowed=y (access date: 09.09.2026).
7. Kunin Yu. S., Ermak A. L. Raschet konstrukcij usileniya kolonn (metallicheskoj obojmoj iz ugolkov) s uchyotom fizicheskoj nelinejnosti v programmnom komplekse // Inzhenernyj vestnik Dona T. 1. 2025.
8. Karpenko N.I., Sokolov B.S., Radajkin O.V. Proektirovanie betonnyh, zhelezobetonnyh, kamennyh i armokamennyh ehlementov i konstrukcij s primeneniem diagrammnyh metodov raschyota: monografiya. M: Izdatel'stvo ASV, 2019. 194 p.
9. Radajkin O.V. Sravnitel'nyj analiz razlichnyh diagramm deformirovaniya betona po kriteriyu ehnergozatrat na deformirovanie i razrushenie // Vestnik BGTU im. V.G. Shuhova. 2019. №10. Pp. 29-39.
10. Radajkin O.V., Nesterov D.V. Modelirovanie usileniya stal'noj obojmoj kolonny ehstakady s uchetom fizicheskoj nelinejnosti //Inzhenernyj vestnik dona № 2. 2026