

СТРОИТЕЛЬНЫЕ КОНСТРУКЦИИ, ЗДАНИЯ И СООРУЖЕНИЯ

УДК 624.016

DOI 10.36622/VSTU.2021.63.3.001

КОМБИНИРОВАННОЕ УСИЛЕНИЕ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОЛОНН СТАЛЬНОЙ ОБОЙМОЙ С ОБЕТОНИРОВАНИЕМ

Ю. Г. Москалькова¹, С. В. Данилов², В. А. Ржевущая³*Белорусско-Российский университет^{1,2,3}
Республика Беларусь, г. Могилев*

¹ Канд. техн. наук, доц., доц. кафедры промышленного и гражданского строительства,
тел.: +375(29)74-29-183, e-mail: julia43@lut.by

² Канд. техн. наук, доц. кафедры промышленного и гражданского строительства,
тел.: +375(29)74-59-597, e-mail: danilov2901@mail.ru

³ Аспирант кафедры промышленного и гражданского строительства, тел.: +375(44)54-91-181,
e-mail: valeriarzhevuckaya@gmail.com

Постановка задачи. Исследуется метод усиления железобетонных колонн устройством стальной обоймы с обетонированием, который позволяет восстанавливать эксплуатационные показатели колонн, имеющих значительные дефекты и повреждения. Предпосылкой настоящих исследований явилось предположение о том, что усиление стальной обоймой с обетонированием является эффективным способом повышения несущей способности железобетонных колонн, причем вариант приложения нагрузки — только на бетонное ядро или ко всему сечению — существенно на эффективность усиления не влияет. В связи с этим целью исследования является определение необходимости устройства стального оголовка и включения в работу ветвей стальной обоймы при условии обетонирования стержня колонны по всей высоте.

Результаты и выводы. Рациональным признан способ передачи нагрузки только на бетонное ядро усиленных колонн, поскольку устройство оголовка стальной обоймы требует применения сложных конструктивно-технологических решений, но при этом дополнительно увеличивает несущую способность незначительно (согласно проведенным исследованиям менее чем на 10 %). Ввиду отсутствия необходимости устройства конструкций стального оголовка снижаются трудоемкость и сроки производства работ по усилению колонн.

Ключевые слова: колонны, железобетон, сталь, усиление, восстановление, обойма, сжатие, разрушающая нагрузка, центральное нагружение, напряжения, деформации.

Введение. Железобетонные колонны относятся к конструкциям первой степени ответственности, для которых снижение эксплуатационных показателей может привести к ограниченному или полному отказу. Усиление колонн устройством различных обойм позволяет существенно повысить их несущую способность и восстановить эксплуатационные качества.

Традиционно применяются железобетонные или стальные обоймы. Могут также устраиваться обоймы из различных композитных материалов (углеволокна, стекловолокна и т. п.) [11, 16, 21], но такие методы усиления связаны с соблюдением определенных условий и требований: ограничением температур при эксплуатации, защитой от воздействия ультрафиолетовых лучей, также не допускается наклейка углеродных лент и сеток на поверхность

с трещинами шириной раскрытия более 0,2 мм и т. п. [5]. В работе [17] предложен метод усиления железобетонных колонн металлическими сетками.

Устройство железобетонных обойм является одним из самых простых и надежных конструктивных решений по усилению железобетонных колонн. Такие обоймы толщиной от 60 до 120 мм могут устраиваться на всю высоту усиливаемой колонны или в пределах поврежденного участка [22]. Однако устройство железобетонных обойм, армированных стержневой арматурой, трудоемко и требует разработки решений по обеспечению совместной работы арматуры усиления с арматурой усиливаемой колонны.

Усиление колонн стальной обоймой незначительно увеличивает размер поперечного сечения и позволяет использовать колонну в эксплуатационном режиме сразу же после ее усиления. Эффективность усиления колонн стальной обоймой неоднократно обоснована [9, 13, 14]. Например, в работе [6] эмпирически установлено, что в результате применения этого способа усиления несущая способность железобетонной колонны увеличивается как минимум на 20 %. Результаты хорошо согласуются с данными, приведенными в [7, 10, 17, 19].

Целью настоящего исследования являлось выявление необходимости включения в работу ветвей стальной обоймы при условии обетонирования стержня колонны по всей высоте. Рассмотрен вариант передачи нагрузки только на бетонное ядро усиленного сечения (непосредственно колонну и обетонирование). Такой вариант усиления позволит значительно снизить трудоемкость и сократить сроки производства работ.

1. Влияние накопленных дефектов на несущую способность усиленных колонн.

Вследствие наличия дефектов, полученных и накопленных в процессе эксплуатации, несущая способность колонн может быть значительно снижена, и техническое состояние таких колонн оценивается как неработоспособное (неудовлетворительное).

В [17] были рассмотрены два случая испытания железобетонных колонн, усиленных стальной обоймой: в первом случае образцы до усиления не были нагружены; во втором случае для опытных образцов в виде призм было создано предварительное нагружение величиной 60, 70 и 80 % от прогнозируемой разрушающей нагрузки. Результаты испытаний показали, что наличие предварительного нагружения до усиления — это можно рассматривать как моделирование работы реальной конструкции — приводит к уменьшению несущей способности усиленной колонны. Схожие данные получены в [19].

Наличие в колоннах дефектов, в том числе трещин, до усиления оказывает влияние на несущую способность железобетонных колонн [7, 18]. Авторами [18] были исследованы железобетонные колонны квадратного, прямоугольного и круглого сечения, усиленные после появления трещин. Зафиксировано снижение несущей способности на 15,7, 14,1 и 13,5 % по сравнению с образцами, не имеющими трещин к моменту усиления. В [7] рассмотрены два варианта усиления образцов железобетонных колонн круглого, прямоугольного и квадратного сечения стальной обоймой с последующим обетонированием: усиление непосредственно после завершения процесса твердения образца и усиление образцов, имеющих дефекты. В первом случае несущая способность образцов в результате усиления увеличилась на 30 %, во втором случае (при наличии дефектов) — на 20 %. Таким образом, наличие дефектов оказывает существенное влияние на эффективность усиления.

В связи с необходимостью восстановления поверхности колонн для устройства стальных обойм применяют комбинированные обоймы: стальные поверх бетонных. Для устройства бетонных обойм применяют фибробетоны с использованием, как правило, полимерного фибрового волокна [10].

Комбинирование бетонной обоймы (из тяжелого бетона, фибробетона или другого вида бетона) и стальной обоймы позволяет использовать преимущества обоих видов усиления. Стальная обойма с обетонированием может устраиваться при значительном разрушении бетона колонны и коррозии арматуры.

Применение комбинированных обойм связано прежде всего с тем, что устройство стальных обойм предполагает предварительную подготовку поверхности железобетонной колонны, в частности восстановление защитного слоя бетона для арматуры усиливаемой конструкции, который в большинстве случаев оказывается сильно поврежден. На рис. 1 приведены характерные дефекты железобетонных колонн, техническое состояние которых по результатам обследования было признано неработоспособным, и были даны рекомендации по усилению методом стальной обоймы с обетонированием.

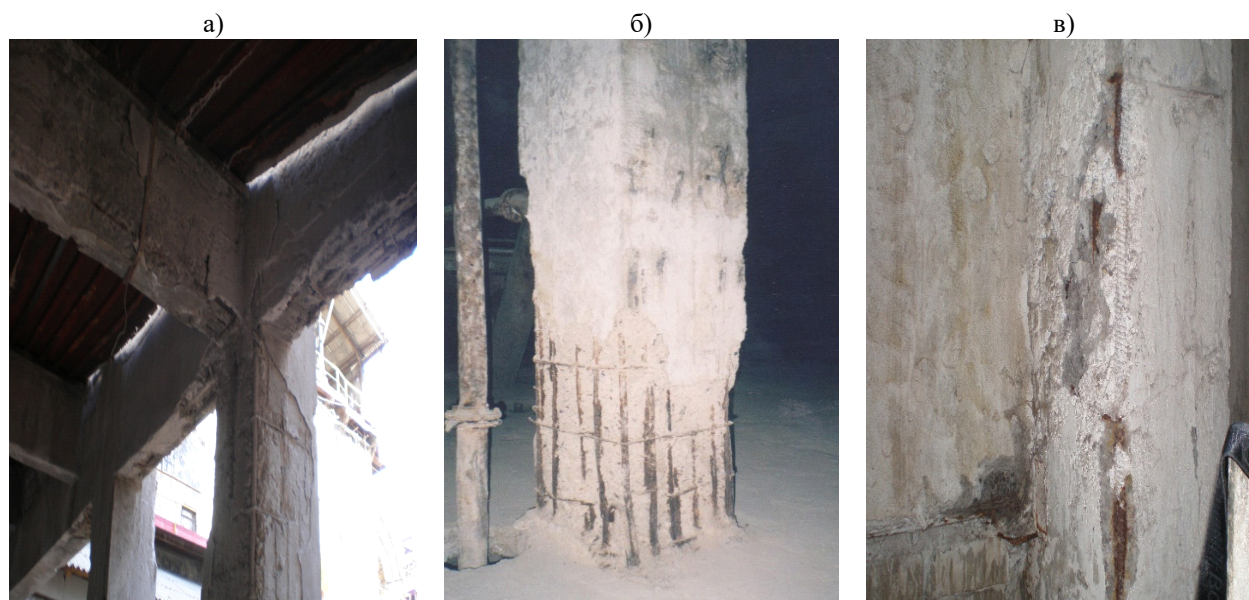


Рис. 1. Характерные дефекты железобетонных колонн:

- а) сколы бетона, обнажение и коррозия рабочей арматуры; б) разрушение сечения колонны, коррозия и разрывы рабочей арматуры; в) сколы бетона на гранях, выбоины, раковины

Основная сложность при устройстве усиления методом стальной обоймы с обетонированием — включение в работу ветвей обоймы. Очевидно, что наиболее эффективным способом нагружения является приложение нагрузки по всему сечению усиливаемой колонны — одновременно на бетонное ядро и стальную обойму усиления через оголовки. В [22] рассмотрены различные варианты усиления стальной обоймой железобетонных колонн и эмпирически доказано, что увеличение площади включаемых в работу стальных элементов и высоты обоймы положительно влияет на несущую способность усиленной колонны. Существуют различные методы включения ветвей стальной обоймы в работу: использование винтовых или гидравлических домкратов [2], стягивание ветвей распорки.

Однако устройство оголовка конструкции усиления (стальной обоймы) характеризуется значительной трудоемкостью и сложностью его формирования. А при использовании метода стягивания ветвей распорки для создания требуемого предварительного напряжения стальной обоймы при включении ее в совместную работу с усиливаемой колонной расчетное удлинение ветвей распорки в зависимости от длины колонны должно составлять 0,6—1,2 мм. Такое незначительное удлинение технически сложно реализовать при изготовлении и монтаже элементов в реальных производственных условиях.

2. Экспериментальные исследования работы бетонных образцов в виде призм, усиленных стальной обоймой. Цели экспериментальных исследований — установить влияние способа нагружения на несущую способность опытных бетонных призм, усиленных стальной обоймой; на основе экспериментальных данных обосновать возможность применения конечно-элементного моделирования для исследования влияния способа нагружения на несущую способность железобетонных колонн, усиленных стальной обоймой с обетонированием.

Всего было испытано 16 опытных призм квадратного поперечного сечения (без армирования) с геометрическими размерами 100×100×600 мм, усиленных стальной обоймой. Продольные элементы обоймы состояли из равнополочных уголков № 20, соединенных между собой поперечными планками размерами 100×20×4 мм при помощи электродуговой сварки. Также было испытано 8 опытных контрольных призм без усиления с геометрическими размерами, аналогичными образцам с усилением. Испытания проводились в испытательной лаборатории отдела качества ГУКДПИП «Институт «Могилевсельстройпроект».

Конструкции опытных и контрольных призм показаны на рис. 2.

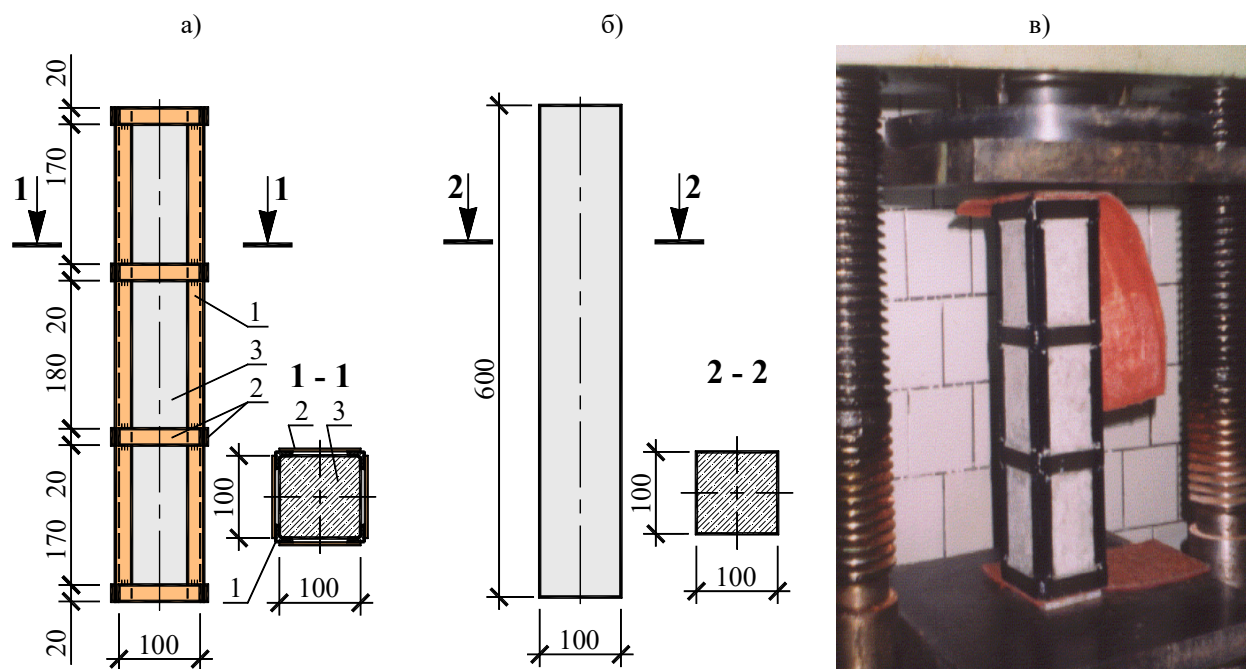


Рис. 2. Испытание опытных и контрольных призм:

- а) опытные призм, усиленные стальной обоймой; б) опытные контрольные призм без усиления;
в) испытание усиленной опытной призм на гидравлическом прессе;
1 — уголок равнополочный $\angle 20 \times 4$; 2 — стальные пластины обоймы усиления (планки); 3 — бетонное ядро

Для приготовления бетона применялся портландцемент марки 400, расход вяжущего составлял 290 кг/м³. В качестве крупного заполнителя использовался гранитный щебень фракции 5—20 мм, в качестве мелкого — кварцевый песок с объемным весом 1520 кг/м³ и модулем крупности 1,61. Осадка конуса бетонной смеси — 4—6 см, водоцементное отношение $B/C = 0,65$. Уплотнение бетонной смеси производилось на виброплощадке.

Основные характеристики затвердевшего бетона согласно *Eurocode 2* (ТКП EN 1992-1-1-2009* (02250), EN 1992-1-1:2004) следующие: средняя прочность на сжатие $f_{cm} = 16,85$ МПа; средняя прочность на растяжение $f_{ctm} = 1,2$ МПа; средний модуль упругости $E_{cm} = 28,85$ ГПа.

Условия твердения бетонной смеси нормальные: температура — 18—20 °С, относительная влажность воздуха — 70—80 %. Испытания проводились в возрасте 28 сут.

Уголки и поперечные пластины стальной обоймы изготовлены из стали С245 согласно ГОСТ 27772—2015 (S235 согласно *Eurocode 3* (ТКП EN 1993-1-1-2009* (02250), EN 1993-1-1:2005, табл. 3.1) с механическими свойствами (по результатам испытаний на растяжение): предел текучести $f_y = 240$ МПа; предел прочности на растяжение (временное сопротивление) $f_u = 360$ МПа; модуль упругости $E_s = 206$ ГПа.

Применение стали с номинальным значением предела текучести $f_y = 240$ МПа для изготовления стальных обойм обосновано в [15]. Такая сталь является конструкционной (соглас-

но *Eurocode 3*) и часто применяется для изготовления прокатных стальных профилей, обычно используемых при устройстве обоем. Аналогичная сталь применялась для изготовления стальных обоем в исследованиях [12].

Опытные и контрольные призмы испытывались на гидравлическом прессе. Нагрузка на образец прикладывалась по физической оси. Нагружение производилось ступенями, равными примерно 10 % от прогнозируемой разрушающей нагрузки, со скоростью нагружения 0,2—0,3 МПа в секунду. На каждой ступени делались пятиминутные выдержки.

При нагружении контрольных призм нагрузка передавалась на все поперечное сечение образца. Нагрузка на усиленные опытные призмы передавалась через стальные распределительные пластины двумя способами:

- способ 1: по всему сечению усиленной призмы;
- способ 2: только на бетонное ядро без нагружения стальной обоем.

Для опытных бетонных призм, усиленных стальной обоем (П-1...П-16), в начале нагружения напряжения в бетоне увеличивались с повышением деформаций, а затем начинали убывать. При разрушении опытных усиленных образцов зафиксированы напряжения в бетоне ниже кратковременной призмной прочности (ниспадающая ветвь на диаграмме деформирования). Наблюдалось перераспределение усилий в сечении опытного усиленного образца с бетона на упруго работающую стальную обоем усиления.

Разрушение опытных призм (П-1...П-8) при первом способе нагружения (нагрузка передавалась на образцы колонн, усиленных стальной обоем, по всему сечению усиления) происходило в результате раздробления бетона в средней части образца с последующим выпучиванием продольных уголков обоем усиления на участке между поперечными планками. Деформирование бетонного ядра образцов и стальной обоем усиления происходило совместно на всех этапах нагружения.

При втором способе нагружения (нагрузка передавалась на образцы, усиленные стальной обоем, только на бетонное ядро, без нагружения стальной обоем) разрушение опытных образцов (П-9...П-16) происходило в результате раздробления бетона в средней части образца с последующей деформацией в указанной области металлической обоем усиления.

В программном комплексе *Lira-Windows* (блок нелинейных расчетов) смоделирована работа опытных призм при рассмотренных способах нагружения.

Структура бетона неоднородна. При силовом воздействии в бетоне появляются микротрещины, как правило, по контакту плотного крупного заполнителя и цементного камня. Микротрещины при последующем росте нагрузки развиваются, сливаются в макротрещины и делят структуру бетона на блоки, которые, сдвигаясь относительно друг друга, приводят к разрушению. Ввиду сложного процесса трещинообразования конечно-элементное моделирование работы сжатых бетонных элементов не может отразить особенности их деформирования в процессе нагружения, однако результаты, полученные при разрушающей нагрузке, имеют удовлетворительную сходимость с опытными данными.

Результаты испытания опытных образцов, статистическая обработка данных, а также результаты численного моделирования для опытных призм приведены в таблице.

Анализ полученных результатов показал, что наибольшей несущей способностью обладают опытные образцы, усиленные стальной обоем, при передаче нагрузки по всему сечению (первый способ нагружения). В то же время полученные результаты свидетельствуют о высокой эффективности усиления опытных призм стальной обоем даже при условии, что на продольные элементы обоем нагрузка не передавалась: отмечено повышение несущей способности на 63 % по сравнению с неусиленными образцами.

Согласно *Eurocode* (СН 2.01.01-2019, EN 1990:2002+A1:2005) проведена оценка корректности применения численного моделирования с использованием метода конечных элементов для оценки величины напряжений и деформаций опытных призм (рис. 3).

Результаты испытаний на сжатие и численного моделирования
для опытных образцов в виде призм

Контролируемые параметры		Способ нагружения		
		Нагружение усиленных призмных образцов		Нагружение контрольных призмных образцов без усиления
		по всему сечению (способ 1)	на бетонное ядро (способ 2)	
Шифр образцов		П-1...П-8	П-9...П-16	ПК-1...ПК-8
Разрушающая нагрузка, кН (среднее значение)		366,1	266,0	163,0
Среднее квадратическое отклонение S , кН		2,59	1,77	1,41
Коэффициент вариации V , %		0,71	0,67	0,87
Коэффициент Стьюдента t_p ($P = 0,95$)		2,37	2,37	2,37
Критерий Романовского t' ($P = 0,95$)		2,51	2,51	2,51
Относительная погрешность результатов Δ , %		4,74	4,46	3,32
Контролируемые параметры бетона при разрушающей нагрузке	Напряжения в бетоне σ_c , МПа	16,2...17,2	15,8...17,1	14,8...16,8
	Относительные деформации ε_c	$(82...90) \cdot 10^{-5}$	$(74...82) \cdot 10^{-5}$	$(44...53) \cdot 10^{-5}$
Средние значения парамет- ров для серии образцов	Напряжения σ_{cm} , МПа	16,7	16,5	15,8
	Относительные деформации ε_{cm}	$86,8 \cdot 10^{-5}$	$77,4 \cdot 10^{-5}$	$48,0 \cdot 10^{-5}$
Результаты численного моделирования	Напряжения в бетоне $\sigma_{c, cal}$, МПа	16,6	16,4	15,9
	Относительные деформации $\varepsilon_{c, cal}$	$87,5 \cdot 10^{-5}$	$76,5 \cdot 10^{-5}$	$50,7 \cdot 10^{-5}$

Поскольку на диаграмме « $r_e - r_t$ » (r_e — экспериментальные данные, r_t — расчетные результаты) все точки расположены близко к прямой $r_e = b \cdot r_t$, а угол наклона прямой составляет примерно 45° ($\arctan b^{(\sigma c)} = \arctan 1,0011 = 45,03^\circ$; $\arctan b^{(\varepsilon c)} = \arctan 0,9916 = 44,76^\circ$), при этом коэффициент вариации для вектора ошибок не превышает 5 % ($V_{\delta}^{(\sigma c)} = 0,84 \% < 5 \%$; $V_{\delta}^{(\varepsilon c)} = 3,55 \% < 5 \%$), коэффициент детерминации R^2 не ниже 0,9 ($R^{2(\sigma c)} = 0,9261$; $R^{2(\varepsilon c)} = 0,9909$), следовательно, применяемую конечно-элементную модель можно считать надежной и достаточно точной.

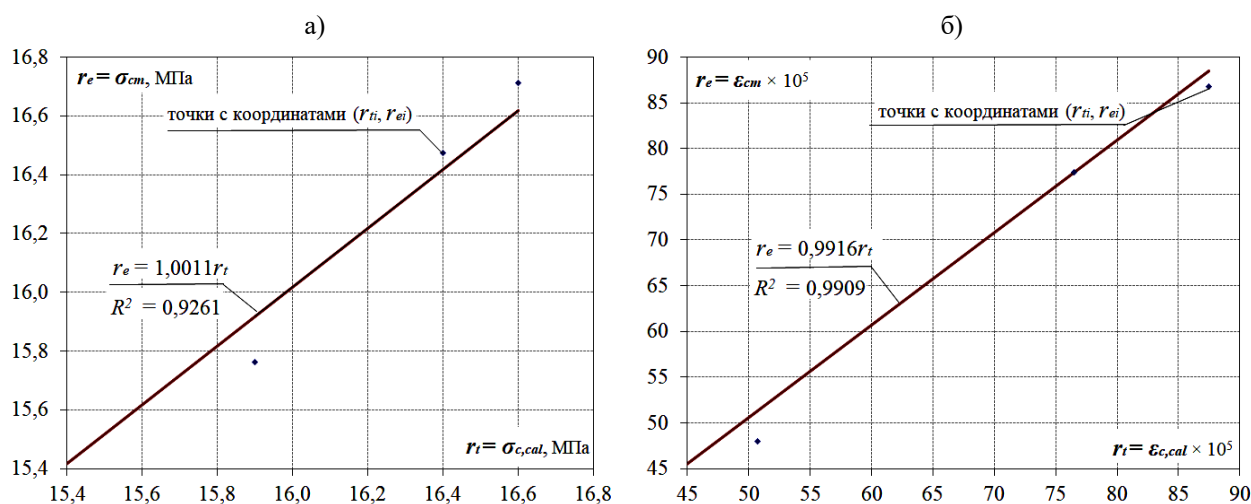


Рис. 3. Диаграмма « $r_e - r_t$ »:
а) для напряжений; б) для относительных деформаций

Также возможность применения конечно-элементного моделирования работы железобетонных колонн, усиленных стальной облойкой, экспериментально обоснована в работе [6].

3. Моделирование работы колонн, усиленных стальной облойкой с обетонированием. В технической литературе [1—4] отсутствуют данные о степени влияния способа нагру-

жения на несущую способность усиливаемой железобетонной колонны. При наличии оголовка конструкции усиления нагрузка на усиливаемую железобетонную колонну может передаваться по всему сечению усиленной колонны, а при отсутствии оголовка — только на сечение усиливаемой колонны и обетонирование (бетонное ядро).

Предпосылкой теоретических исследований явилось предположение о том, что усиление стальной обоймой с обетонированием является эффективным способом повышения несущей способности железобетонных колонн, причем вариант приложения нагрузки — только на бетонное ядро или ко всему сечению — существенно на эффективность усиления не влияет.

Решение поставленной задачи выполнено с использованием метода конечных элементов, позволяющего учесть конструктивно-технологические особенности, характер взаимодействия элементов усиления и усиливаемой колонны и перераспределение нагрузок между ними. Решение реализовано в ПК *Lira-Windows* (блок нелинейных расчетов). Задача решалась в контактной постановке с учетом упругопластических характеристик материалов. Для исключения необходимости определения внутренних усилий в системе, передаваемых между ее элементами, и создания адекватного нагружения были использованы конечно-элементные модели, сформированные объемными элементами. Для сопоставления результатов также была создана модель железобетонной колонны, усиленной только обетонированием. При этом поперечное сечение обетонированной колонны принято равнопрочным.

Для определения напряженного состояния элементов теоретические значения эквивалентных напряжений и результирующих деформаций вычислялись для моделей усиленных железобетонных колонн со следующими характеристиками. Геометрические размеры усиливаемой железобетонной колонны — 400×400 мм, высота — 3600 мм. Бетонная обойма толщиной 60 мм. Размеры бетонного ядра — 520×520 мм. Характеристики бетона колонны согласно *Eurocode 2*: класс бетона — C30/37 (B35 согласно СП 63.13330.2018); нормативное сопротивление осевому сжатию $f_{ck} = 30$ МПа; нормативное сопротивление осевому растяжению $f_{ctk} = 2$ МПа; расчетное сопротивление сжатию $f_{cd} = 20$ МПа; расчетное сопротивление растяжению $f_{ctd} = 1,33$ МПа; модуль упругости бетона $E_{cm} = 33$ ГПа; коэффициент поперечных деформаций (Пуассона) $\nu_c = 0,2$; плотность $\rho = 2400$ кг/м³. Характеристики арматуры колонны согласно *Eurocode 2*: класс продольной арматуры — S500, нормативное сопротивление $f_{yk} = 500$ МПа, расчетное сопротивление $f_{yd} = 435$ МПа; класс поперечной арматуры — S240, расчетное сопротивление $f_{ywd} = 174$ МПа; модуль упругости арматуры $E_s = 200$ ГПа. Характеристики стали обоймы усиления согласно *Eurocode 3*: $f_y = 240$ МПа; $f_u = 360$ МПа; $E = 206$ ГПа. Обетонирование конструкции усиления запроектировано из бетона, аналогичного бетону усиливаемой колонны. Значение прочности сцепления стали с бетоном — 1,4 МПа.

Нагружение модели железобетонной колонны, усиленной стальной обоймой с обетонированием, проводилось двумя способами. Способ 1: нагружение модели железобетонной колонны, усиленной стальной обоймой с обетонированием, по всему сечению (рис. 4). Способ 2: нагружение модели железобетонной колонны, усиленной стальной обоймой с обетонированием, на бетонное ядро без нагружения стальной обоймы усиления (рис. 5). Для сопоставления исследуемых данных также проводилось нагружение модели железобетонной колонны, усиленной только обетонированием, с аналогичными геометрическими и прочностными характеристиками (рис. 6).

По результатам моделирования (рис. 4, 5) видно, что для колонн, усиленных стальной обоймой с обетонированием, наибольшие результирующие деформации отмечены в оголовке, наименьшие — у опоры. От оголовка к опоре по длине колонны деформации уменьшаются равномерно. При этом отмечено скачкообразное изменение поперечных деформаций бетонного ядра, связанное с образованием микротрещин и их последующим слиянием в макротрещины. Результирующие деформации стальной обоймы и бетонного ядра на всех этапах нагружения имели сопоставимые значения, что подтверждает предположение о совместной работе стальной обоймы и бетонного ядра (усиливаемая колонна и бетон обетонирования).

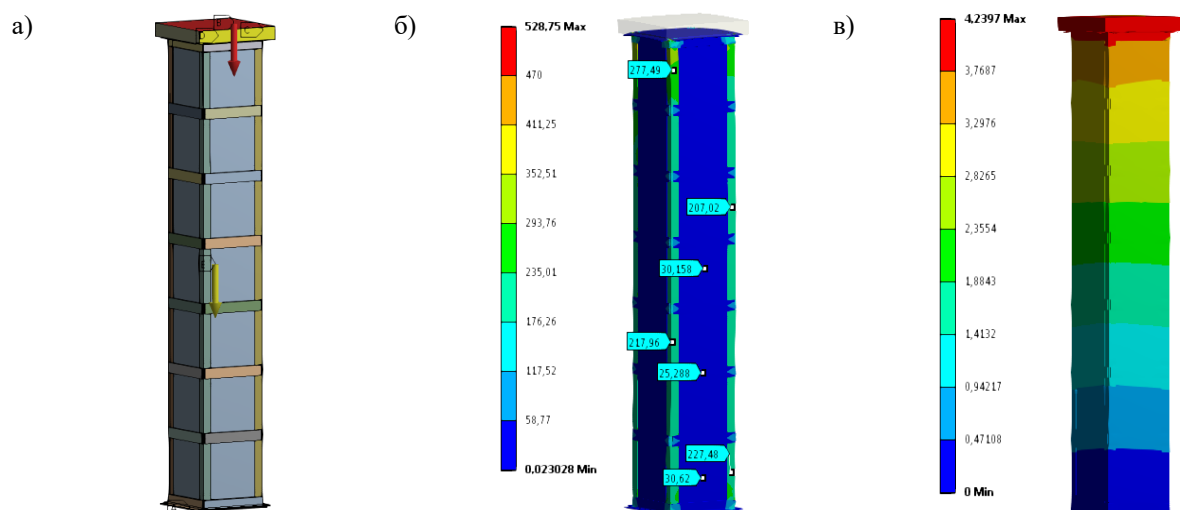


Рис. 4. Схема нагружения и распределение эквивалентных напряжений и результирующих деформаций при нагружении модели колонны, усиленной стальной обоймой с обетонированием, по всему сечению (способ 1):
 а) схема нагружения; б) эквивалентные напряжения, МПа; в) результирующие деформации, мм

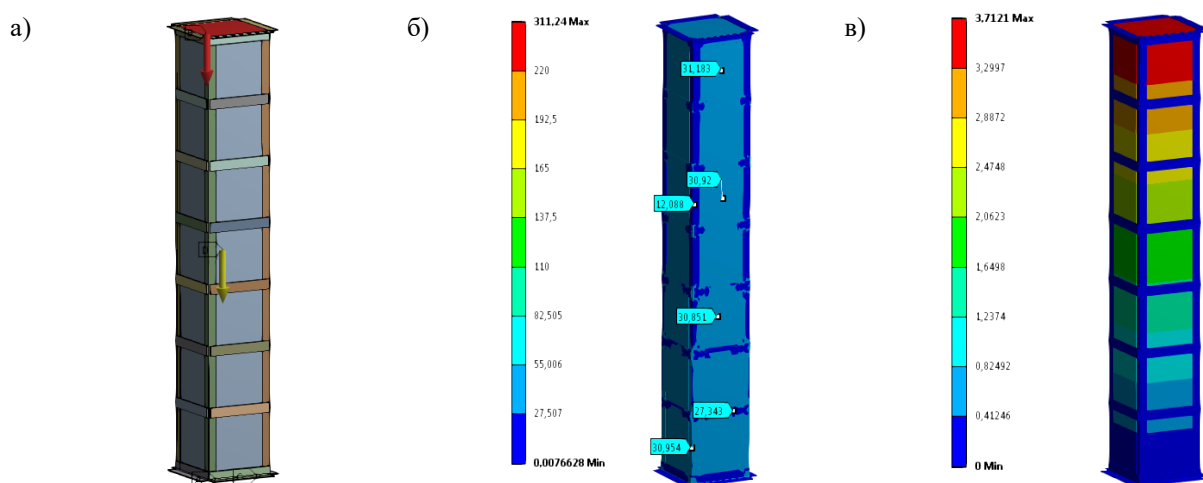


Рис. 5. Схема нагружения и распределение эквивалентных напряжений и результирующих деформаций при нагружении модели колонны, усиленной стальной обоймой с обетонированием, на бетонное ядро (способ 2):
 а) схема нагружения; б) эквивалентные напряжения, МПа; в) результирующие деформации, мм

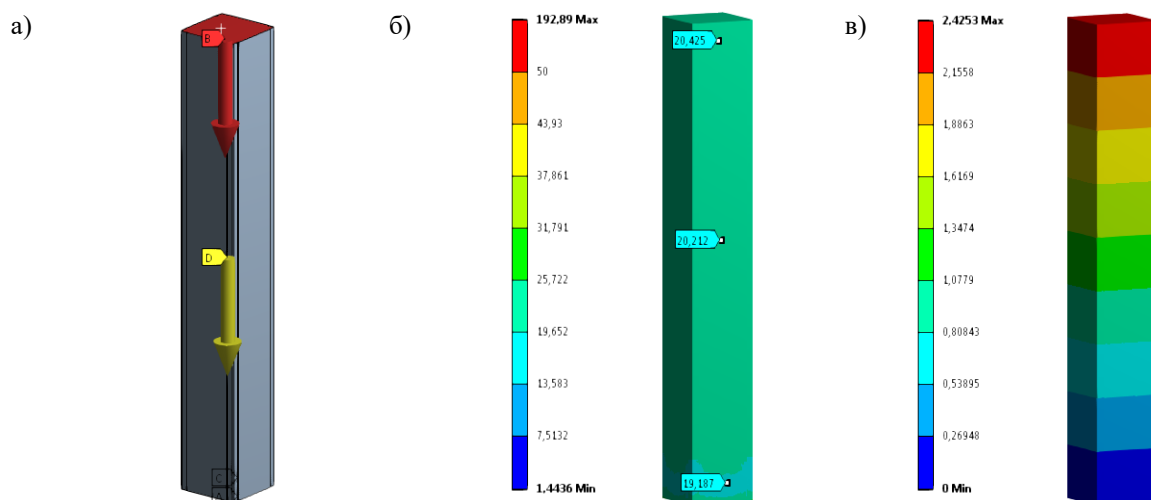


Рис. 6. Схема нагружения и распределение эквивалентных напряжений и результирующих деформаций при нагружении модели колонны, усиленной только обетонированием:
 а) схема нагружения; б) эквивалентные напряжения, МПа; в) результирующие деформации, мм

4. Результаты моделирования работы колонн, усиленных стальной обоймой с обетонированием. На рис. 7 приведены результаты моделирования работы усиленных железобетонных колонн: при усилении только обетонированием разрушающая нагрузка составляет $N_{u,0} = 5200$ кН; при усилении стальной обоймой с обетонированием и передаче нагрузки на все сечение $N_{u,1} = 9050$ кН; при усилении стальной обоймой с обетонированием и передаче нагрузки на бетонное ядро без нагружения ветвей стальной обоймы $N_{u,2} = 8450$ кН. Также графики, приведенные на рис. 7, наглядно демонстрируют, что в случае усиления колонн стальной обоймой характер разрушения более пластичный по сравнению с эталонным железобетонным образцом.

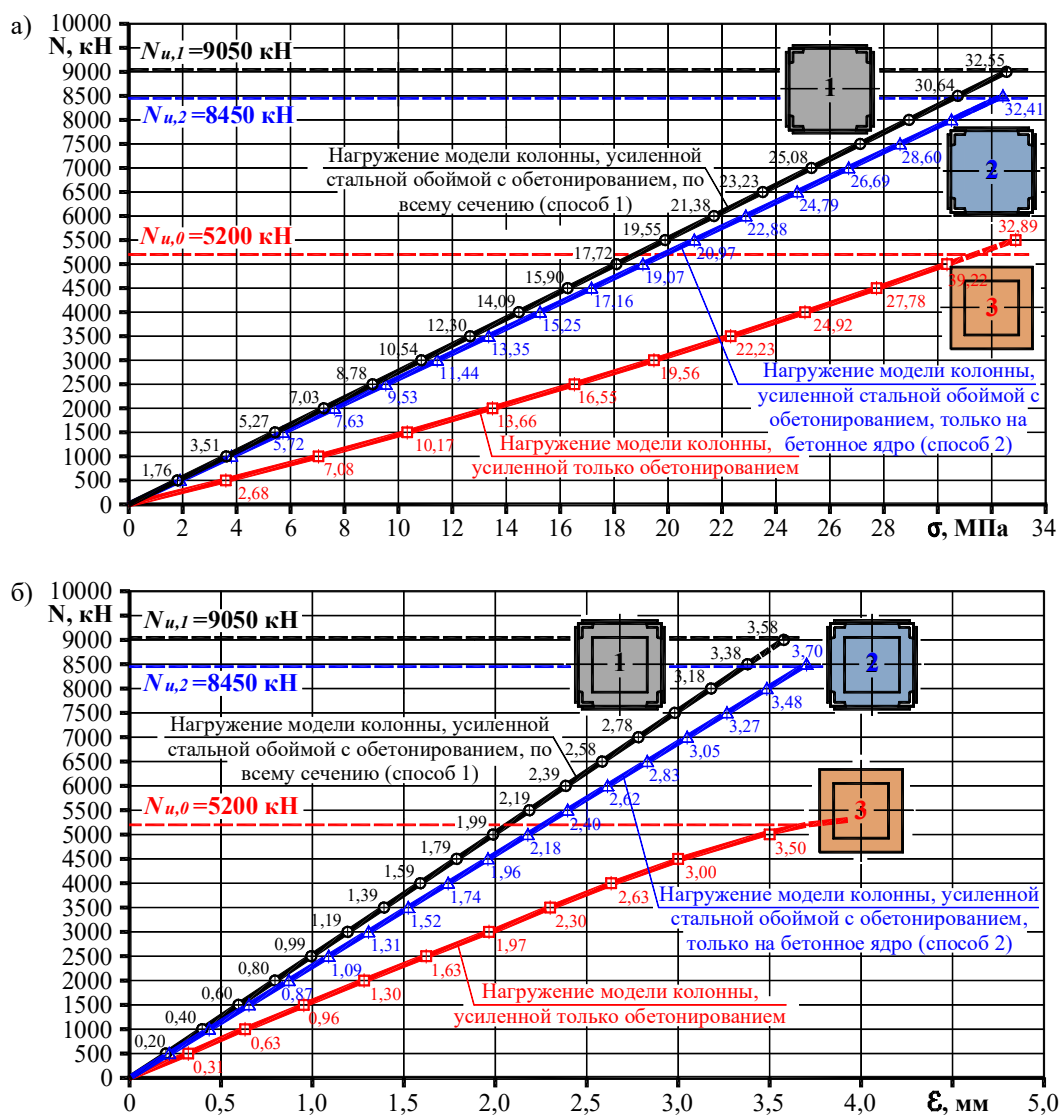


Рис. 7. Изменение результирующих деформаций и эквивалентных напряжений с ростом нагрузки при различных способах нагружения:

а) для эквивалентных напряжений; б) для результирующих деформаций

Этот эффект был отмечен также в работах [6, 7, 10]. По результатам исследований очевидно, что наибольшая несущая способность усиленных железобетонных колонн отмечена в случае передачи нагрузки на все сечение: на бетонное ядро и на ветви стальной обоймы ($N_{u,1} = 9050$ кН). При этом предельное напряженно-деформированное состояние усиленных колонн при передаче нагрузки только на бетонное ядро (усиливаемая колонна и бетон обетонирования) наступает при величине нагрузки $N_{u,2} = 8450$ кН, что свидетельствует о достаточ-

ной низкой — менее 10 % — эффективности передачи нагрузки на все сечение, включая ветви стальной обоймы ($\Delta \% = [9050 - 8450] / 8450 \cdot 100 \% = 7,1 \%$). Наряду с этим устройство стального оголовка является трудоемким и материалоемким процессом, выполняемым в стесненных условиях производства работ, характерных для реконструкции и модернизации зданий.

Таким образом, при передаче нагрузки на все сечение (включая элементы стальной обоймы) несущая способность усиленной колонны увеличивается менее чем на 10 % по сравнению с вариантом нагружения только бетонного ядра. На этом основании целесообразным представляется отказаться от устройства оголовка стальной обоймы, что позволит значительно сократить трудоемкость и сроки производства работ и упростить конструктивное решение усиления железобетонных колонн методом стальной обоймы с обетонированием.

Устройство обетонирования помимо функции повышения несущей способности также выполняет функции восстановления эксплуатационных качеств железобетонных колонн. Это позволяет нивелировать влияние поверхностных дефектов и повреждений, накопленных в колонне к моменту усиления, на эффективность усиления стальной обоймой: в [7, 18] эмпирически доказано, что применение стальных обойм для поврежденных колонн значительно менее эффективно, чем для колонн без дефектов.

Выводы

1. Усиление железобетонных колонн стальной обоймой с обетонированием позволяет существенно повысить несущую способность эксплуатируемых колонн. Этим способом могут быть усилены колонны, техническое состояние которых оценивается как неработоспособное (неудовлетворительное), т. е. колонны, имеющие многочисленные значительные или критические дефекты и повреждения к моменту усиления.

2. Согласно проведенным экспериментальным и численным исследованиям вариант передачи нагрузки только на бетонное ядро (существующая колонна и обетонирование) без нагружения ветвей стальной обоймы признан более рациональным, т. к. позволяет существенно увеличить несущую способность усиленной колонны и при этом отказаться от устройства оголовка стальной обоймы — процесса трудоемкого и требующего применения сложных конструктивно-технологических решений.

3. Наибольшее увеличение несущей способности колонн в результате усиления стальной обоймой с обетонированием отмечено при передаче нагрузки на все сечение усиленной колонны (существующая колонна, обетонирование и ветви стальной обоймы). При этом несущая способность усиленной колонны возрастает не более чем на 10 % по сравнению с несущей способностью, достигаемой при нагружении только бетонного ядра усиленного сечения.

Библиографический список

1. **Казачек, В. Г.** Обследование и испытание зданий и сооружений / В. Г. Казачек, Н. В. Нечаев, С. Н. Нотенко; под ред. В. И. Римшина. — М.: Высш. шк., 2006. — 655 с.
2. **Лазовский, Д. Н.** Проектирование реконструкции зданий и сооружений: в 3 ч. Ч. 2: Оценка состояния и усиление строительных конструкций / Д. Н. Лазовский. — 2-е изд., перераб. и доп. — Новополюк: ПГУ, 2008. — 340 с.
3. **Лазовский, Д. Н.** Теория расчета и конструирование усиления железобетонных конструкций эксплуатируемых строительных сооружений: дис. ... д-ра техн. наук: 10.06.98 / Д. Н. Лазовский. — Минск, 2000. — 376 с.
4. Неразрушающие методы оценки и прогнозирования технического состояния железобетонных конструкций, эксплуатирующихся в воздушных средах / Т. М. Пецольд [и др.]; под общ. ред. А. А. Васильева. — Гомель: БелГут, 2007. — 146 с.
5. Пособие по усилению железобетонных конструкций с использованием композитных материалов. — М.: ФАУ «Федеральный центр нормирования, стандартизации и оценки соответствия в строительстве», 2017. — 226 с.
6. **Belal, M. F.** Behavior of reinforced concrete columns strengthened by steel jacket / M. F. Belal, H. M. Mohamed, S. A. Morad // Housing and Building National Research Center Journal. — 2015. — Vol. 11, Issue 2. — P. 201—212.
7. **El-Badawy Sayed, A.** Retrofitting and Strengthening of Reinforced Concrete Columns Using Steel Jackets; Mechanical Performance and Applications / A. El-Badawy Sayed // Journal of Engineering Sciences. — 2009. — Vol. 37, Issue 3. — P. 563—580.

8. **Gajdosova, K.** Full-Scale Testing of CFRP-Strengthened Slender Reinforced Concrete Columns / K. Gajdosova, J. Bilcik // *Journal of Composites for Construction*. — 2013. — Vol. 17, Issue 2. — P. 239—248.
9. **He, A.** Behaviour of steel-jacket retrofitted RC columns with preload effects / A. He // *Thin-Walled Struct.* — 2016. — Vol. 109. — P. 25—39.
10. **Helles, Z. H.** Strengthening of Square Reinforced Concrete Columns with Fibrous Ultra High Performance Self-Compacting Concrete Jacketing: Master Thesis Islam ... Master Degree in Design and Rehabilitation of Structures; the Islamic University Gaza / Z. H. Helles. — 2014. — P. 156—172.
11. **Huang, L.** FRP-confined concrete-encased cross-shaped steel columns: Concept and behaviour / L. Huang, T. Yu, S. — S. Zhang, Z. — Y. Wang // *Engineering Structures*. — 2017. — Vol. 152. — P. 348—358.
12. **Khalifa, E. S.** Experimental and analytical behavior of strengthened reinforced concrete columns with steel angles and strips / E. S. Khalifa, S. H. Al-Tersawy // *Int. J. Adv. Struct. Eng.* — 2014. — Vol. 6, Issue 2. — P. 1—14.
13. **Kim, S. H.** Seismic retrofit of rectangular RC bridge columns using wire mesh wrap casing / S. H. Kim, D. K. Kim // *KSCE Journal of Civil Engineering*. — 2011. — Vol. 15, Issue 7. — P. 1227—1236.
14. **Montuori, R.** Reinforced concrete columns strengthened with angles and battens subjected to eccentric load / R. Montuori, V. Piluso // *Engineering Structures*. — 2009. — Vol. 31, Issue 2. — P. 539—550.
15. **Mostafa, S.** Performance of Steel-Jacketed RC columns using various cementitious materials: Master's thesis ... Masters of Science in Construction Engineering // S. Mostafa; the American University in Cairo. — 2019. — P. 81.
16. **Sajedi, F.** Evaluation and comparison of GFRP casing and CFRP sheets application on the behavior of circular reinforced concrete column made of high-strength concrete / F. Sajedi, M. Shafieinia // *Asian Journal of Civil Engineering*. — 2019. — Vol. 20, Issue 8. — P. 1153—1161.
17. **Salman, H. M.** Finite Element Modeling of a Reinforced Concrete Column Strengthened with Steel Jacket / H. M. Salman, M. H. Al-Sherrawi // *Civil Engineering Journal*. — 2018. — Vol. 4, Issue 5. — P. 916—925.
18. **Sayed, A. M.** Experimental behavior of cracked reinforced concrete columns strengthened with reinforced concrete jacketing / A. M. Sayed, M. M. Rashwan, M. E. Helmy // *Materials (Basel)*. — 2020. — Vol. 13, Issue 12 — P. 1—14.
19. **Shafei, E.** Plasticity constitutive modeling of partially confined concrete with steel jacketing / E. Shafei, J. M. Rahmdel // *KSCE Journal of Civil Engineering*. — 2017. — Vol. 21, Issue 7. — P. 2738—2750.
20. **Sinkovskaya, O.** Peculiarities of carrying capacity evaluations of cylindrical CFST columns with new type casing / O. Sinkovskaya, A. Ignatenko // *MATEC Web of Conferences*. — 2017. — Vol. 116. — P. 1—8.
21. **Trapko, T.** Effect of eccentric compression loading on the strains of FRCM confined concrete columns // *Construction and Building Materials*. — 2014. — Vol. 61. — P. 97—105.
22. **Xu, C. X.** Study on seismic behavior of encased steel jacket-strengthened earthquake-damaged composite steel-concrete columns / C. X. Xu, S. Peng, J. Deng, C. Wan // *Journal of Building Engineering*. — 2018. — Vol. 17 — P. 154—166.

References

1. **Kazachek, V. G.** Obsledovanie i ispytanie zdaniy i sooruzheniy / V. G. Kazachek, N. V. Nechaev, S. N. Notenko; pod red. V. I. Rimshina. — M.: Vyssh. shk., 2006. — 655 s.
2. **Lazovskii, D. N.** Proektirovanie rekonstruktsii zdaniy i sooruzheniy: v 3 ch. Ch. 2: Otsenka sostoyaniya i usilenie stroitel'nykh konstruktsii / D. N. Lazovskii. — 2-e izd., pererab. i dop. — Novopolotsk: PGU, 2008. — 340 s.
3. **Lazovskii, D. N.** Teoriya rascheta i konstruirovaniye usileniya zhelezobetonnykh konstruktsii ekspluatiruemyykh stroitel'nykh sooruzheniy: dis. ... d-ra tekhn. nauk: 10.06.98 / D. N. Lazovskii. — Minsk, 2000. — 376 s.
4. Nerazrushayushchie metody otsenki i prognozirovaniye tekhnicheskogo sostoyaniya zhelezobetonnykh konstruktsii, ekspluatiruyushchikhsya v vozdushnykh sredakh / T. M. Petsol'd [i dr.]; pod obshch. red. A. A. Vasil'eva. — Gomel': BelGut, 2007. — 146 s.
5. Posobie po usileniyu zhelezobetonnykh konstruktsii s ispol'zovaniem kompozitnykh materialov. — M.: FAU Federal'nyi tsentr normirovaniya, standartizatsii i otsenki sootvetstviya v stroitel'stve, 2017. — 226 s.
6. **Belal, M. F.** Behavior of reinforced concrete columns strengthened by steel jacket / M. F. Belal, H. M. Mohamed, S. A. Morad // *Housing and Building National Research Center Journal*. — 2015. — Vol. 11, Issue 2. — P. 201—212.
7. **El-Badawy Sayed, A.** Retrofitting and Strengthening of Reinforced Concrete Columns Using Steel Jackets; Mechanical Performance and Applications / A. El-Badawy Sayed // *Journal of Engineering Sciences*. — 2009. — Vol. 37, Issue 3. — P. 563—580.
8. **Gajdosova, K.** Full-Scale Testing of CFRP-Strengthened Slender Reinforced Concrete Columns / K. Gajdosova, J. Bilcik // *Journal of Composites for Construction*. — 2013. — Vol. 17, Issue 2. — P. 239—248.
9. **He, A.** Behaviour of steel-jacket retrofitted RC columns with preload effects / A. He // *Thin-Walled Struct.* — 2016. — Vol. 109. — P. 25—39.
10. **Helles, Z. H.** Strengthening of Square Reinforced Concrete Columns with Fibrous Ultra High Performance Self-Compacting Concrete Jacketing: Master Thesis Islam ... Master Degree in Design and Rehabilitation of Structures; the Islamic University Gaza / Z. H. Helles. — 2014. — P. 156—172.

11. **Huang, L.** FRP-confined concrete-encased cross-shaped steel columns: Concept and behaviour / L. Huang, T. Yu, S. — S. Zhang, Z. — Y. Wang // *Engineering Structures*. — 2017. — Vol. 152. — P. 348—358.
12. **Khalifa, E. S.** Experimental and analytical behavior of strengthened reinforced concrete columns with steel angles and strips / E. S. Khalifa, S. H. Al-Tersawy // *Int. J. Adv. Struct. Eng.* — 2014. — Vol. 6, Issue 2. — P. 1—14.
13. **Kim, S. H.** Seismic retrofit of rectangular RC bridge columns using wire mesh wrap casing / S. H. Kim, D. K. Kim // *KSCE Journal of Civil Engineering*. — 2011. — Vol. 15, Issue 7. — P. 1227—1236.
14. **Montuori, R.** Reinforced concrete columns strengthened with angles and battens subjected to eccentric load / R. Montuori, V. Piluso // *Engineering Structures*. — 2009. — Vol. 31, Issue 2. — P. 539—550.
15. **Mostafa, S.** Performance of Steel-Jacketed RC columns using various cementitious materials: Master's thesis ... Masters of Science in Construction Engineering // S. Mostafa; the American University in Cairo. — 2019. — P. 81.
16. **Sajedi, F.** Evaluation and comparison of GFRP casing and CFRP sheets application on the behavior of circular reinforced concrete column made of high-strength concrete / F. Sajedi, M. Shafieinia // *Asian Journal of Civil Engineering*. — 2019. — Vol. 20, Issue 8. — P. 1153—1161.
17. **Salman, H. M.** Finite Element Modeling of a Reinforced Concrete Column Strengthened with Steel Jacket / H. M. Salman, M. H. Al-Sherrawi // *Civil Engineering Journal*. — 2018. — Vol. 4, Issue 5. — P. 916—925.
18. **Sayed, A. M.** Experimental behavior of cracked reinforced concrete columns strengthened with reinforced concrete jacketing / A. M. Sayed, M. M. Rashwan, M. E. Helmy // *Materials (Basel)*. — 2020. — Vol. 13, Issue 12 — P. 1—14.
19. **Shafei, E.** Plasticity constitutive modeling of partially confined concrete with steel jacketing / E. Shafei, J. M. Rahmdel // *KSCE Journal of Civil Engineering*. — 2017. — Vol. 21, Issue 7. — P. 2738—2750.
20. **Sinkovskaya, O.** Peculiarities of carrying capacity evaluations of cylindrical CFST columns with new type casing / O. Sinkovskaya, A. Ignatenko // *MATEC Web of Conferences*. — 2017. — Vol. 116. — P. 1—8.
21. **Trapko, T.** Effect of eccentric compression loading on the strains of FRCM confined concrete columns // *Construction and Building Materials*. — 2014. — Vol. 61. — P. 97—105.
22. **Xu, C. X.** Study on seismic behavior of encased steel jacket-strengthened earthquake-damaged composite steel-concrete columns / C. X. Xu, S. Peng, J. Deng, C. Wan // *Journal of Building Engineering*. — 2018. — Vol. 17 — P. 154—166.

COMBINED REINFORCED CONCRETE COLUMNS STRENGTHENING WITH STEEL CLIPPING AND CONCRETE SURFACING

Yu. G. Moskal'kova ¹, S. V. Danilov ², V. A. Rzhevutskaya ³

*Belarusian-Russian University, ^{2,3}
Republic of Belarus, Mogilev*

¹ *PhD in Engineering, Assoc. Prof. of the Dept. of Industrial and Civil Construction, tel.: +375(29)74-29-183, e-mail: julia43@tut.by*

² *PhD in Engineering, Assoc. Prof. of the Dept. of Industrial and Civil Construction, tel.: +375(29)74-59-597, e-mail: danilov2901@mail.ru*

³ *PhD student of the Dept. of Industrial and Civil Construction, tel.: +375(44)54-91-181, e-mail: valeriarzhevuckaya@gmail.com*

Statement of the problem. The method of strengthening reinforced concrete columns with a steel clipping and the concrete surfacing is investigated. This method allows one to repair the columns with significant defects and damage. The prerequisite for this study was the assumption of strengthening with a steel clipping and the concrete surfacing is an effective way to increase the ultimate limit state of reinforced concrete columns, furthermore, the option of applying the load (only to the concrete core or to the entire section) does not significantly affect the strengthening effectiveness. In this regard, the purpose of the investigation was to identify the need to include the steel jacketing in the work, on the condition the column is coated with concrete along with the entire height.

Results and conclusions. The load transfer method only to the concrete core of the strengthened columns is recognized as rational since the device of the steel clipping head requires the use of complex structural and technological solutions, but at the same time additionally increases the ultimate limit state insignificantly (according to the studies by less than 10 %). Due to the absence of the need to establish structures of the steel jacketing head, the labor intensiveness and terms of work production on strengthening the columns are reduced.

Keywords: columns (structural), reinforced concrete, strengthening (metal), retrofitting, jacketing, compaction, interfaces (materials), load limits, axial loads, strain hardening, stresses.