

Academia. Архитектура и строительство, № 3, стр. 140–148.

Academia. Architecture and Construction, no. 3, pp. 140–148.

Исследования и теория

Научная статья

УДК 624.075.23

DOI: 10.22337/2077-9038-2023-3-140-148

Самозаклинивающиеся элементы в трубобетонных колоннах

Римшин Владимир Иванович (Москва). Доктор технических наук, профессор, член-корреспондент РААСН. Кафедра жилищно-коммунального комплекса Национального исследовательского Московского государственного строительного университета (Россия, 129337, Москва, Ярославское шоссе, 26. НИУ МГСУ). Эл. почта: RimshinVI@mgsu.ru

Кришан Анатолий Леонидович (Магнитогорск). Доктор технических наук, профессор, советник РААСН. Кафедра проектирования и строительства зданий Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова (455000, Магнитогорск, просп. Ленина, 38, МГТУ им. Г.И. Носова). Эл. почта: kris_al@mail.ru

Астафьева Мария Анатольевна (Магнитогорск). Кандидат технических наук, доцент. Кафедра проектирования и строительства зданий Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова (455000, Магнитогорск, просп. Ленина, 38, МГТУ им. Г.И. Носова). Эл. почта: skymanika@mail.ru

Аннотация. Выполнено исследование образцов трубобетонных колонн круглого сечения (ТБК) при местном сжатии с начальным эксцентриситетом. Для повышения прочности внецентренно сжатых ТБК в бетонном ядре размещались стальные самозаклинивающиеся элементы. Они укладывались в три ряда в пространстве между верхним торцом свежесушеного бетона и внутренней поверхностью стальной трубы. Причём, нижний и верхний слои самозаклинивающих элементов выполнялись в форме частично усечённых тетраэдров, полученных разрезанием кубов плоскостями, проходящими через середины их рёбер, на две равные части. Между слоями усечённых тетраэдров размещался слой кубов таким образом, чтобы все элементы плотно соприкасались между собой своими гранями. Выполненные эксперименты подтвердили способность самозаклинивающихся структур за счёт высокой жёсткости более равномерно перераспределять передающиеся через них сосредоточенные нагрузки. Показано, что подбор рациональной геометрии элементов структуры самозаклинивающихся элементов и условий их взаимодействия друг с другом может являться эффективным методом повышения жёсткости определённых участков конструкций. Использование структуры из трёх слоев самозаклинивающихся элементов заметно изменило характер деформирования и разрушения образцов ТБК, что привело к увеличению прочности исследованных образцов в среднем на 11%.

Ключевые слова: трубобетонная колонна, внецентренное сжатие, самозаклинивающиеся элементы, жесткость, прочность

Финансирование. Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-19-20073.

Для цитирования. Римшин В.И., Кришан А.Л., Астафьева М.А. Самозаклинивающиеся элементы в трубобетонных колоннах // Academia. Архитектура и строительство. – 2023. – № 3. – С. 140–148. – DOI: 10.22337/2077-9038-2023-3-140-148.

Self-Locking Elements in Pipe-Concrete Columns

Rimshin Vladimir I. (Moscow). Doctor of Sciences in Technology, Professor, Corresponding Member of RAACS. Department of housing and communal complex of the National Research Moscow State University of Civil Engineering (Russia, 129337, 26, Yaroslavskoye Shosse, Moscow, Russia. NRU MGSU).

Krishan Anatolii L. (Magnitogorsk). Doctor of Sciences in Technology, Professor, Adviser of RAACS. Department of Design and Buildings' Construction of the Nosov Magnitogorsk State Technical University (Lenin Street, 38, Magnitogorsk city, Chelyabinsk Region, 455000, Russia. NMSTU). E-mail: kris_al@mail.ru

Astafeva Mariya A. (Magnitogorsk). Candidate of Sciences in Technology, Docent. Department of Design and Buildings' Construction of the Nosov Magnitogorsk State Technical University (Lenin Street, 38, Magnitogorsk city, Chelyabinsk Region, 455000, Russia. NMSTU). E-mail: skymanika@mail.ru

Abstract. The study of samples of tubular concrete columns of circular cross-section (TBC) under local compression with initial eccentricity was carried out. To increase the strength of non-centrally compressed TBCs, steel self-locking elements were placed in the concrete core. They were laid in three rows in the space between the upper end of the freshly laid concrete and the inner surface of the steel pipe. Moreover, the lower and upper layers of self-locking elements were made in the form of partially truncated tetrahedra obtained by cutting cubes with planes passing through the middle of their edges into two equal parts. A layer of cubes was placed between the layers of truncated tetrahedra in such a way that all the elements were in close contact with each other with their faces. The experiments performed have confirmed the ability of self-locking structures due to their high rigidity to redistribute concentrated loads transmitted through them more evenly. It is shown that the selection of the rational geometry of the structural elements of self-locking elements and the conditions of their interaction with each other can be an effective method of increasing the rigidity of certain sections of structures. The use of a structure of 3 layers of self-sealing elements significantly changed the nature of deformation and destruction of TBC samples, which led to an increase in the strength of the studied samples by an average of 11%.

Keywords: pipe-concrete column, off-center compression, self-locking elements, rigidity, strength

Funding. The study was supported by the grant of the Russian Science Foundation (No. 22-19-20073).

For citation. Rimshin V.I., Krishan F.L., Astafeva M.A. Self-Locking Elements in Pipe-Concrete Columns. In: *Academia. Architecture and Construction*, 2023, no. 3, pp. 140–148, doi: 10.22337/2077-9038-2023-3-140-148.

Введение

Предметом данного исследования являются трубобетонные колонны круглого сечения (ТБК), у которых в верхнем торце бетонного ядра размещены самозаклинивающиеся элементы. Колонна из бетона в стальной трубе – относительно новая и весьма эффективная вертикальная несущая конструкция. В последние годы в мировой практике строительства ТБК применяют всё шире, особенно при строительстве высотных зданий и многоэтажных зданий с увеличенной сеткой колонн [1–5]. Это объясняется целым рядом существенных положительных свойств данных конструкций. Среди основных из них можно выделить высокую прочность и жёсткость, пластический характер разрушения, значительную живучесть [6–11]. Максимальную прочность имеют центрально загруженные ТБК круглого сечения. Но с ростом эксцентриситета сжимающей силы их прочность довольно быстро снижается из-за неравномерного обжатия бетонного ядра [12–14]. В реальных зданиях колонны необходимо рассчитывать на различные сочетания усилий, в том числе с максимальными значениями изгибающих моментов. В этой связи нередко приходится учитывать данную особенность ТБК и увеличивать расход металлической арматуры, которая повышает прочность конструкции, что приведет к росту их стоимости.

Целью исследования является повышение прочности внецентренно сжатых ТБК за счёт использования в них

самозаклинивающихся элементов. Самозаклинивающиеся элементы представляют собой совокупность выпуклых тел определённой формы, которые в виде объёмной структуры так размещены в пространстве, что любое бесконечно малое перемещение одного из этих тел возможно лишь как часть совместного перемещения всех их вместе. При использовании структуры из нескольких слоёв тел любые местные воздействия на них приводят к одновременному заклиниванию всех слоёв. Такое свойство самозаклинивающихся элементов наделяет их важной особенностью. При внешнем воздействии на них в определённом направлении и фиксации границы по периметру в трансверсальном направлении составленная из них структура становится очень жёсткой. Она способна к эффективному перераспределению внешних воздействий между всеми элементами, что можно использовать на практике, например, для выравнивания эпюры нормальных напряжений в сечениях конструкций.

Открытие самозаклинивающихся структур совершенно математиками в начале XXI века [15–18]. Затем эта тема была предложена к исследованию применительно к архитектуре и естественным наукам [19–27]. Перспективность её дальнейшего исследования и распространения подтверждается публикацией в высокорейтинговом журнале «Nature» [20]. В строительных конструкциях самозаклинивающиеся струк-

туры пока не применялись. Поэтому данная работа является пилотной.

Эффективность использования самозаклинивающихся элементов была проверена на примере внецентренно сжатых ТБК. Экспериментальные образцы имели круглое поперечное сечение и изготавливались из тяжёлого бетона класса В25, заключённого в стальную трубу. Использовались электросварные трубы $\varnothing 108 \times 4$ мм по ГОСТ 10705-80¹, изготовленные из стали класса С235. Нижние торцы образцов перед формированием бетонной смесью закрывались металлическими пластинами толщиной 8 мм.

Исследуемые образцы были разделены на две серии – ТБ и ТБС (по три образца в каждой). Из смеси одного замеса одновременно изготавливались по одному образцу каждой серии. Образцы серии ТБ заполнялись бетонной смесью до верхнего торца. В образцах серии ТБС бетонная смесь не доходила до верхнего торца на 50 мм.

После окончания процесса формирования образцов серии ТБС в пространстве между верхним торцом свежесложенного бетона и внутренней поверхностью стальной трубы укладывались три ряда стальных самозаклинивающихся элементов (рис. 1). Причём, нижний и верхний слои самозаклинивающихся элементов были выполнены в форме частично усечённых тетраэдров, полученных разрезанием кубов плоскостями, проходящими через середины их рёбер, на две равные части (рис. 2).

Основания этих элементов образуют правильные шестиугольники. Они расположены горизонтально и плотно соприкасаются своими рёбрами с соседними элементами слоя. Нижний слой самозаклинивающихся элементов раскладывался на поверхности бетона, а верхний слой был ориентирован основаниями вверх. Между слоями усечённых тетраэдров размещались слои кубов таким образом, чтобы все элементы плотно соприкасались между собой своими гранями. Свободное пространство между внутренней поверхностью

трубы и слоями элементов заполнено гипсовой смесью. По верхнему слою укладывался бетон толщиной около 15 мм.

Параллельно с образцами ТБ и ТБС в соответствии с ГОСТ 10180-2012² изготавливались контрольные образцы бетона в виде кубов и призм размерами $100 \times 100 \times 100$ мм и $100 \times 100 \times 400$ мм. Прочность кубов и призм составила порядка 31 МПа и 26 МПа соответственно. Механические характеристики стали определялись по результатам испытаний на растяжение пяти вырезанных из трубы стальных полос с размерами 450×20 мм. Среднее значение предела текучести стали составило 280 МПа, временное сопротивление – 420 МПа. Результаты испытаний контрольных образцов бетона и стали позволили в первом приближении рассчитать прочность и назначить величину ступеней загрузки трубобетонных элементов.

До испытаний все образцы трубобетонных элементов хранились в одинаковых условиях при температуре 20 ± 3 °С. Трубобетонные образцы испытывались в соответствии с требованиями ГОСТ 8829-2018³ в вертикальном положении на гидравлическом прессе ИП-2000 в возрасте 30 суток. Опирание торцов – шарнирное. Образцы испытывались на местное сжатие. Сжимающая нагрузка в верхнем торце передавалась на бетонное ядро через стальную полусферу. Эксцентриситет приложения продольной сжимающей силы e_0 по отношению к геометрическому центру сечения был принят равным 10 мм ($e_0/d \approx 0,1$).

Для измерения продольных и поперечных деформаций стальной трубы во время испытаний применялись тензорезисторы (тензодатчики) с базой 50 мм и тензометры Аистова с ценой деления 0,001 мм. Все измерительные приборы устанавливались на наиболее и наименее сжатой стороне внецентренно сжатых трубобетонных элементов. Тензометры размещались в средней части высоты их сечения для контроля показаний тензодатчиков. Тензодатчики наклеивались на наружную поверхность трубы двумя вертикальными цепочками,

¹ ГОСТ 10705-80 «Трубы стальные электросварные. Технические условия» (<http://vsegost.com/Catalog/47/4756.shtml>).

² ГОСТ 10180-2012 «Бетоны. Методы определения прочности по контрольным образцам» (<http://vsegost.com/Catalog/56/56431.shtml>).

³ ГОСТ 8829-94 «Изделия строительные железобетонные и бетонные заводского изготовления. Методы испытаний нагружением. Правила оценки прочности, жесткости и трещиностойкости» (<http://vsegost.com/Catalog/91/9158.shtml>).

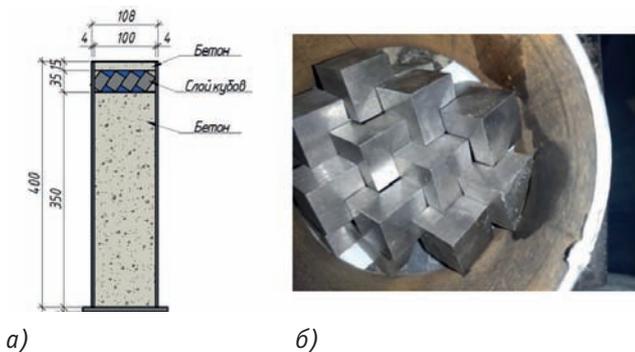


Рис. 1. Конструкция образца серии ТБС: а) продольный разрез; б) самозаклинивающиеся элементы в момент укладки. Фото сделано авторами статьи во время эксперимента

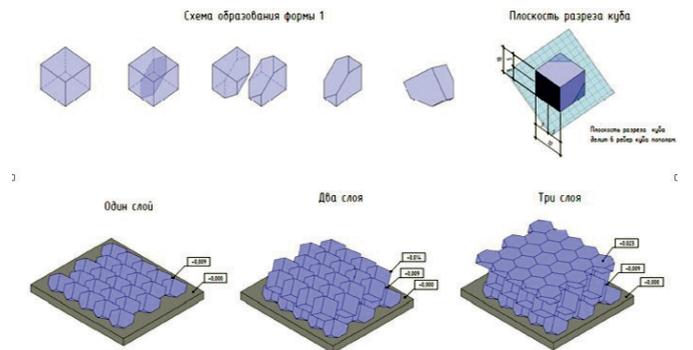


Рис. 2. Самозаклинивающиеся элементы и их раскладка по слоям

начиная от верхних торцов элементов до средней части высоты их сечения. На расстоянии 50 мм от верхнего торца и в середине высоты трубобетонных образцов наклеивалось по два тензорезистора в окружном направлении. Регистрация показаний тензорезисторов осуществлялась при помощи универсального переносного многоканального измерительно-вычислительного комплекса МИС-036.

Образцы нагружались ступенями по 10% от ожидаемой разрушающей нагрузки N_{ur} до $0,7N_u$. Далее, величина нагружения на ступени была принята $0,05N_u$ вплоть до остановки роста сжимающей нагрузки. За время 10-минутной выдержки на каждой ступени фиксировались показания измерительных приборов.

Основные результаты испытаний, содержащие данные по кубиковой и призменной прочности исходного бетона (R и R_{bu}), а также прочности исследованных лабораторных образцов N_u^{exp} , представлены в таблице 1. Здесь же приведены результаты сопоставления разрушающих нагрузок с теоретическими значениями прочности сжатых трубобетонных

элементов N_u^{th} , а также с суммарной прочностью бетонного ядра и стальной оболочки в предположении их работы на одноосное сжатие N_{bp}^{th} . Значения N_u^{th} рассчитывались по методике, предложенной в работе [6]. Поскольку для образцов серии ТБ $N_u^{th} \approx N_u^{exp}$, для образцов серии ТБС коэффициент $m_s = N_u^{exp} / N_u^{th}$ количественно выражает эффективность использования самозаклинивающихся элементов.

Величину N_{bp}^{th} вычисляли по формуле:

$$N_{bp}^{th} = n_e (R_{bu} A + \sigma_y A_p), \quad (1)$$

где σ_y – предел текучести стальной трубы-оболочки; A , A_p – площадь бетонного ядра и стальной оболочки; n_e – параметр, учитывающий эксцентриситет приложения нагрузки и определяемый по формуле:

$$n_e = 1 - 0,85 \cdot \sqrt{e_0/d}. \quad (2)$$

Отношение $k = N_u^{exp} / N_{bp}^{th}$ количественно выражает эффективность косвенного армирования.

Данные таблицы 1 свидетельствуют о следующем. В образцах обеих серий проявился эффект косвенного армирования, который зависит от прочности исходного бетона и параметров стальной трубы-оболочки. Эффективность косвенного армирования в образцах серии ТБ составила порядка 50%. У образцов серии ТБС она заметно выше – в среднем 68%. Следовательно, замена тремя слоями самозаклинивающихся элементов части бетонного ядра в трубобетонных образцах не только не снизила их способность к сопротивлению местному сжатию, но и сказалась положительно на прочности исследуемых образцов. Коэффициент m_s у образцов с самозаклинивающимися элементами примерно на 11% выше.

В целом характер силового сопротивления и разрушения образцов ТБ и ТБС был схож (рис. 3, 4).

В упруго-пластической стадии наблюдался переход металла трубы-оболочки в текучее состояние. Визуально это определялось по линиям Чернова-Людерса, проявляющимся на наружной поверхности стальной трубы-оболочки. В пластической стадии перед непосредственным разрушением наблюдались значительные продольные деформации укорочения наиболее сжатой грани, достигающие более 1% длины.



Рис. 3. Характер разрушения образцов ТБ. Фото сделано авторами статьи во время эксперимента



Рис. 4. Характер разрушения образцов ТБС. Фото сделано авторами статьи во время эксперимента

Таблица 1. Прочность исследованных трубобетонных образцов

№ п/п	Серия, образец	R , МПа	R_{bu} , МПа	N_u^{exp} , кН	N_u^{th} , кН	$m_s = \frac{N_u^{exp}}{N_u^{th}}$	N_{bp}^{th} , кН	$k = \frac{N_u^{exp}}{N_{bp}^{th}}$
1	ТБ – 1	31,1	26,1	640	639	1,00	423	1,51
2	ТБ – 2	31,1	25,4	630	632	1,00	419	1,50
3	ТБ – 3	29,9	26,6	640	649	0,98	426	1,50
4	ТБС – 1	31,1	26,1	710	639	1,11	423	1,68
5	ТБС – 2	31,1	25,4	700	632	1,11	419	1,67
6	ТБС – 3	29,9	26,6	725	649	1,12	426	1,70

Стальная труба-оболочка в местах разрушения бетонного ядра выпучивалась наружу.

При общей схожести характер разрушения образцов серии ТБС имел некоторые отличия. Во всех образцах серии ТБ видимые разрушения наблюдались у верхнего торца (в непосредственной близости от места приложения сжимающей нагрузки). Образцы с самозаклинивающимися элементами имели существенные разрушения не только в районе верхнего торца, но практически по всей их высоте.

По результатам замера деформаций на поверхности стальной трубы-оболочки для образцов обеих серий построены зависимости « $n - \varepsilon$ » (здесь $n = N/N_u$ – относительный уровень нагрузки). Характерные зависимости для различных сечений по высоте образцов обеих серий представлены на рисунке 5. Из рисунка видно, что характер деформирования стальной трубы в середине высоты образцов серий ТБ и ТБС одинаков. Продольные деформации при нагрузке 95% от разрушающей достигают 0,008 – в образцах серии ТБ и 0,0065 в образцах серии ТБС. Ближе к верхним торцам образцов картина деформирования стальной трубы меняется. Особенно сильно это изменение в образцах серии ТБ, где на расстоянии 75 мм от верхнего торца при нагрузке 95% от разрушающей продольные относительные деформации едва достигают 0,001. В образцах серии ТБС они значительно больше (порядка 0,0045). Горизонтальные тензодатчики, расположенные в середине высоты образцов, показывали окружные деформации в диапазоне 0,0007–0,001.

Полученные результаты испытаний свидетельствуют о том, что образцы с самозаклинивающимися элементами лучше сопротивляются внецентренному сжатию. У них выше прочность и коэффициент эффективности косвенного армирования. Характер деформирования и разрушения образцов серии ТБС свидетельствует о более полном включении в работу бетонного ядра и стальной оболочки.

Отмеченные различия силового сопротивления образцов двух серий имеют следующее объяснение. В образцах серии

ТБ в непосредственной близости от площадки передачи местной нагрузки сопротивление сжатию оказывала только часть бетонного ядра. При этом и стальная труба полноценно включалась в работу лишь на расстоянии порядка полутора диаметров поперечного сечения от верхнего торца образца. В результате разрушение образцов этой серии было вызвано раздроблением бетона в верхнем торце с последующим выпучиванием здесь же стальной трубы (см. рис. 3). Никаких признаков разрушения нижерасположенных участков образцов не наблюдалось.

Наличие самозаклинивающихся элементов в районе верхнего торца образцов серии ТБС обусловило иной характер распределения внутренних усилий. Самозаклинивающиеся структуры обладают высокой жёсткостью. Данное обстоятельство способствовало более равномерному деформированию бетонного ядра, расположенному под нижним слоем структуры. Сжимающее усилие, сосредоточенное на небольшой площадке над верхним слоем структуры, перераспределялось практически на всю площадь ядра. При этом за счёт эффекта расклинивания самозаклинивающихся элементов создавалось напряжение окружного направления в стальной трубе в районе верхнего торца. Труба растягивалась в поперечном направлении и обжимала расположенное ниже бетонное ядро. В результате бетон находился в условиях объёмного сжатия. Его прочность и предельная деформативность существенно повышались. Одновременно за счёт сил трения труба активно включалась в сопротивление продольной сжимающей силе. К моменту разрушения гофры на поверхности стальной трубы образовывались практически по всей высоте исследуемых образцов (см. рис. 4).

Представленные на рисунке 5 зависимости « $n - \varepsilon$ » подтверждают выводы, сделанные выше. Распределение продольных деформаций по высоте стальной трубы свидетельствует о более полном включении её в работу образцов серии ТБС. Кроме того, в образцах с самозаклинивающимися

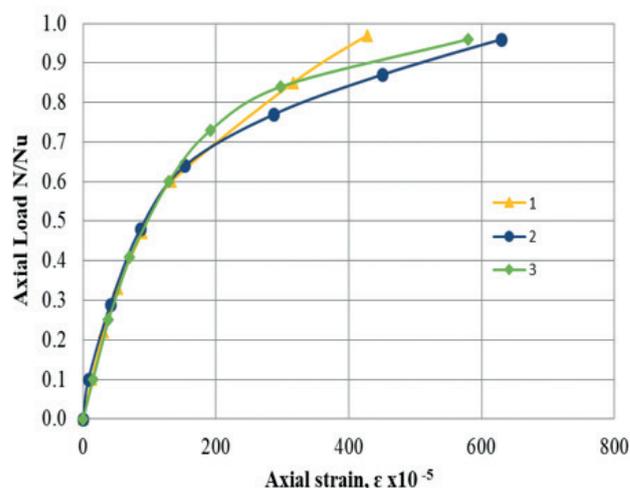
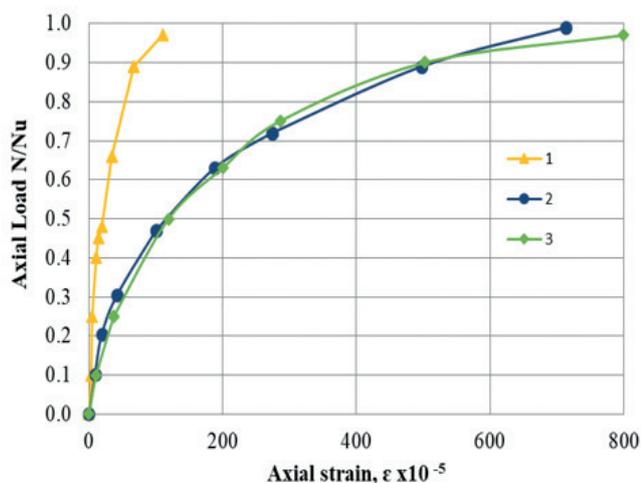


Рис. 5. Характерные зависимости продольных деформаций наиболее сжатой грани образцов серии ТБ (а) и серии ТБС (б) от уровней загрузки: 1 – на расстоянии 75 мм от верхнего торца; 2 – на расстоянии 125 мм; 3 – на расстоянии 175 мм

элементами деформации на наиболее и наименее сжатых сторонах меньше отличаются друг от друга. Следовательно, изгибающий момент от внецентренно приложенной сжимающей силы имеет здесь меньшую величину. Расчёты, выполненные с использованием полученных значений прочности, показали, что применение трёх слоёв самозаклинивающихся элементов в приторцовой зоне образцов ТБС эквивалентно снижению начального эксцентриситета примерно в два раза.

* * *

Проведённые исследования подтвердили способность самозаклинивающихся структур к перераспределению передающихся через них сосредоточенных нагрузок. За счёт высокой жёсткости эти структуры распределяли местные сжимающие нагрузки по всей площади бетонного ядра трубобетонных образцов. Ядро сжималось более равномерно. Использование структуры из трёх слоёв стальных самозаклинивающихся элементов в виде тетраэдров и кубов, установленных в ТБК в зоне передачи местной сжимающей нагрузки, привело к повышению их прочности в среднем на 11%. Повышение прочности достигнуто за счёт выравнивания эпюры нормальных напряжений в нормальном сечении конструкции, результат которого эквивалентен снижению начального эксцентриситета примерно в два раза.

Список источников

1. *Bhure, N.* Steel Concrete Composite Construction / N. Bhure, N. Tiwari. – Текст : электронный // International Journal for Research in Applied Science & Engineering Technology (IJRASET). – 2018. – № 6. – P. 564–566. – URL: <https://www.ijraset.com/fileserve.php?FID=17390> (дата обращения 18.06.2023).
2. An Investigation of Compression Bearing Capacity of Concrete-Filled Rectangular Stainless Steel Tubular Columns under Axial Load and Eccentric Axial Load / Cao B., Zhu L., Jiang X., Wang C. – Текст : электронный // Sustainability. – 2022. – Vol. 14, Iss. 14. – URL: <https://www.mdpi.com/2071-1050/14/14/8946/htm> (дата обращения 18.06.2023).
3. *Han, L.H.* Performans of Concrete-Encased CFST Stub Columns under Axial Compression / L.H. Han, Y.H. An. – DOI:10.1016/j.jcsr.2013.10.019. – Текст : электронный // Journal of Constructional Steel Research. – 2014. – Vol. 93. – P. 62–76. – URL: https://www.researchgate.net/publication/259509720_Performance_of_concrete-encased_CFST_stub_columns_under_axial_compression (дата обращения 18.06.2023).
4. Behaviour and Design of Ultra- High- Strength CFST Members Subjected to Compression and Bending / Z. Huang, D. Li, B. Uy, J. Wang. – DOI: 10.1016/j.jcsr.2020.106351. – Текст : электронный // Journal of Constructional Steel Research. – 2020. – № 175. – URL: https://www.researchgate.net/publication/344401630_Behaviour_and_design_of_ultra-high-strength_CFST_members_subjected_to_compression_and_bending (дата обращения 18.06.2023).
5. *Ly, J.* Investigation and Application of a New Low-Carbon Material (Preplaced Aggregate Concrete) in Concrete-Filled Steel Tube Stub Columns / J. Ly, T. Zhou, K. Li. – Текст : электронный // Sustainability. – 2020. – Vol. 12, Iss. 5. – P. 1768. – URL: <https://www.mdpi.com/2071-1050/12/5/1768> (дата обращения 18.06.2023).
6. *Krishan, A.L.* Strength Calculation of Short Concrete-filled Steel Tube Columns / A.L. Krishan, M.A. Astafeva, E.P. Chernyshova. – Текст : электронный // International Journal of Concrete Structures and Materials. – 2018. – Vol. 12. – URL: <https://doi.org/10.1186/s40069-018-0322-z> (дата обращения 18.06.2023).
7. *Krishan, A.L.* Deformability of a Volume-Compressed Concrete / A.L. Krishan, V.I. Rimshin, M.A. Astafeva. – DOI: 10.1088/1757-899X/463/2/022063. – Текст : электронный // IOP Conference Series Materials Science and Engineering. – 2018. – 463 (2). URL: https://www.researchgate.net/publication/330025335_Deformability_of_a_Volume-Compressed_Concrete/link/5c2a624a458515a4c703a5cb/download (дата обращения 18.06.2023).
8. *Le, T.T.* Prediction of Axial Load Capacity of Rectangular Concrete-Filled Steel Tube Columns Using Machine Learning Techniques / Le T.T., Asteris P.G., Lemonis M.E. – DOI: 10.1007/s00366-021-01461-0. – Текст : электронный // Engineering with Computers. – 2021. – № 1 (34). – URL: https://www.researchgate.net/publication/352786005_Prediction_of_Axial_Load_Capacity_of_Rectangula_Concrete-filled_Steel_Tube_Columns_using_Machine_Learning_Techniques (дата обращения 18.06.2023).
9. *Schneider, S.P.* Axially Loaded Concrete-Filled Steel Tubes / S.P. Schneider. – Текст : электронный // Journal of Structural Engineering-ASCE. – 1998. – № 124. – P. 1125–1138. – URL: <https://www.semanticscholar.org/paper/Axially-Loaded-Concrete-Filled-Steel-Tubes-Schneider/f64f2e2835ede4792be89a123a9a12234644fc6d> (дата обращения 18.06.2023).
10. Compressed Reinforced Concrete Elements Bearing Capacity of Various Flexibility / A.L. Krishan, V.I. Rimshin, I.L. Shubin, M.A. Astafeva, A.A. Stupak. – Текст : электронный // Lecture Notes in Civil Engineering. – 2022. – 182. – P. 283–291. – DOI: 10.1007/978-3-030-85236-8_26.
11. *Uy, B.* Behaviour of Short and slender Concrete-Filled Stainless Steel Tubular Columns / B. Uy, Z. Tao, L.H. Han. – DOI: 10.1016/j.jcsr.2010.10.004. – Текст : электронный // Journal of Constructional Steel Research. – 2011. – Vol. 67. – P. 360–378. – URL: https://www.researchgate.net/publication/241079587_Behaviour_of_short_and_slender_concrete-filled_stainless_steel_tubular_columns (дата обращения 18.06.2023).
12. Experimental and Numerical Studies of Square Concrete-Filled Double Steel Tubular Short Columns under Eccentric Loading / Ahmed M., Liang Q.Q., Patel V.I., Hadi M.N.S. – Текст : электронный // Journal Engineering Structures. – 2019. – 197. – P. 109419. – URL: <https://vuir.vu.edu.au/39331/1/Ep39331.pdf> (дата обращения 18.06.2023).

13. Han, L.H. Behaviour of Concrete Filled Stainless Steel Tubular (CFSSST) Columns / L.H. Han, C.Y. Xu, Z. Tao. – Текст : электронный // *Journal of Constructional Steel Research*. – 2018. – URL: <https://www.researchgate.net/publication/323431446> (дата обращения 18.06.2023). Англ
14. Krishan, A.L. Estimation of Carrying Capacity of Eccentrically Compressed Concrete-Filled Steel Tube Columns / A.L. Krishan, E.A. Troshkina. – Текст : электронный // *Advances of Environmental Biology*. – 2014. – № 8 (7). – P. 1974–1977. – URL: https://www.researchgate.net/publication/288241054_Estimation_of_carrying_capacity_of_eccentrically_compressed_concrete_filled_steel_tube_columns (дата обращения 18.06.2023).
15. Toughening by Fragmentation – How Topology Helps / A.V. Dyskin, Estrin Y., Kanel-Belov A.J., E. Pasternak. – Текст : электронный // *Advanced Engineering Mater.* – 2001. – № 3. – P. 885–888. – URL: https://www.researchgate.net/publication/230317548_Toughening_by_Fragmentation-How_Topology_Helps (дата обращения 18.06.2023).
16. Topological Interlocking of Platonic Solids: A Way to New Materials and Structures / A.V. Dyskin, Estrin Y., Kanel-Belov A.J., E. Pasternak. – Текст : электронный // *Philosophical Magazine Letters*. – 2003. – 83. – P. 197–203. – URL: https://www.researchgate.net/publication/243406596_Topological_interlocking_of_platonic_solids_A_way_to_new_materials_and_structures (дата обращения 18.06.2023).
17. Fracture Resistant Structures Based on Topological Interlocking with Nonplanar Contacts / Dyskin, A.V., Y. Estrin, E. Pasternak [и др.]. – Текст : электронный // *Advanced Engineering Mater.* – 2003. – № 5. – P. 116–119. – URL: https://www.researchgate.net/publication/230013769_Fracture_Resistant_Structures_Based_on_Topological_Interlocking_with_Non-planar_Contacts (дата обращения 18.06.2023).
18. The Principle of Topological Interlocking in Extraterrestrial Construction / Dyskin, A.V., Y. Estrin, E. Pasternak [и др.]. – Текст : электронный // *Acta Astronautica*. – 2005. – 57:1. – P. 10–21. – URL: https://www.researchgate.net/publication/245139582_The_principle_of_topological_interlocking_in_extraterrestrial_construction (дата обращения 18.06.2023).
19. Topological Interlocking of Protective Tiles for Space Shuttle / Y. Estrin, Dyskin, A.V., E. Pasternak [и др.]. – Текст : электронный // *Philosophical Magazine Letters*. – 2003. – № 83. – P. 351–355. – URL: https://www.researchgate.net/publication/243406608_Topological_interlocking_of_protective_tiles_for_the_space_shuttle (дата обращения 18.06.2023).
20. Interlocking Properties of Buckyballs / A.V. Dyskin, Y. Estrin, A.J. Kanel-Belov, E. Pasternak. – Текст : электронный // *Physics Letters A*. – 2003. – 319. – P. 373–378. – URL: https://www.researchgate.net/publication/229375800_Interlocking_properties_of_buckyballs (дата обращения 18.06.2023).
21. Бондаренко, В.М. Диссипативная теория силового сопротивления железо-бетона / В.М. Бондаренко, В.И. Римшин. – Москва : Студент, 2015. – 110 с. – Текст : непосредственный.
22. Варламов, А.А. Модели поведения бетона. Общая теория деградации : монография / А.А. Варламов, В.И. Римшин. – Москва : ИНФРА-М, 2019. – 435 с. – Текст : непосредственный.
23. Римшин, В.И. Построение диаграммы деформирования одноосно сжатого бетона / В.И. Римшин, А.Л. Кришан, А.И. Мухаметзянов. – Текст : непосредственный // *Вестник МГСУ*. – 2015. – № 6. – С. 23–31.
24. Karpenko, N.I. The Limiting Values of Moments and Deformations Ratio in Strength calculations Using Specified Material Diagrams / N.I. Karpenko, V.A. Eryshev, V.I. Rimshin. – Текст : электронный // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. – 2018. – С. 032024. – URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/463/3/032024/pdf> (дата обращения 18.06.2023).
25. Практическая реализация расчёта несущей способности трубобетонных колонн / А.Л. Кришан, В.И. Римшин, В.И. Теличенко [и др.]. – Текст : непосредственный // *Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности*. – 2017. – № 2 (368). – С. 227–232.
26. Krishan, A.L. Strength of Short Concrete Filled Steel Tube Columns of Annular Cross Section / A.L. Krishan, V.I. Rimshin, E.A. Troshkina. – Текст : электронный // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. – 2018. – С. 022062. – URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/463/2/022062/pdf> (дата обращения 18.06.2023).
27. Кришан, А.Л. Расчёт прочности сжатых железобетонных элементов с косвенным армированием / А.Л. Кришан, В.И. Римшин, А.И. Заикин // *Бетон и железобетон – взгляд в будущее : научные труды III Всероссийской (II Международной) конференции по бетону и железобетону : в 7 томах : Том 1*. – Москва : МГСУ, 2014. – С. 308–314

References

1. Bhure, N., Tiwari, N. Steel Concrete Composite Construction. In: *International Journal for Research in Applied Science & Engineering Technology (IJRASET)*, 2018, no. 6, pp. 564–566. URL: <https://www.ijraset.com/files/serve.php?FID=17390> (Accessed 06/18/2023). (In Engl.)
2. Cao B., Zhu L., Jiang X., Wang C. An Investigation of Compression Bearing Capacity of Concrete-Filled Rectangular Stainless Steel Tubular Columns under Axial Load and Eccentric Axial Load. In: *Sustainability*, 2022, Vol. 14, Iss. 14. URL: <https://www.mdpi.com/2071-1050/14/14/8946/htm> (Accessed 06/18/2023). (In Engl.)
3. Han L.H., An Y.H. Performance of Concrete-Encased CFST stub Columns under Axial Compression. In: *Journal of Constructional Steel Research*, 2014, Vol. 93, pp. 62–76, DOI:10.1016/j.jcsr.2013.10.019. URL: https://www.researchgate.net/publication/259509720_Performance_of_concrete-encased_CFST_stub_columns_under_axial_compression (дата обращения 18.06.2023). (Accessed 06/18/2023). (In Engl.)
4. Huang Z., Li D., Uy B., Wang J. Behaviour and Design of Ultra- High- Strength CFST Members Subjected to Compression

- and Bending. In: *Journal of Constructional Steel Research*, September 2020, DOI: 10.1016/j.jcsr.2020.106351. URL: https://www.researchgate.net/publication/259509720_Performance_of_concrete-encased_CFST_stub_columns_under_axial_compression (Accessed 06/18/2023). (In Engl.)
5. Lv J., Zhou T., Li K. Investigation and Application of a New Low-Carbon Material (Preplaced Aggregate Concrete) in Concrete-Filled Steel Tube Stub Columns. In: *Sustainability*, 2020, Vol. 12, p. 1768. URL: <https://www.mdpi.com/2071-1050/12/5/1768> (Accessed 06/18/2023). (In Engl.)
6. Krishan A.L., Astafeva M.A., Chernyshova E.P. Strength Calculation of Short Concrete-filled Steel Tube Columns. In: *International Journal of Concrete Structures and Materials*, 2018, Vol.12. URL: <https://doi.org/10.1186/s40069-018-0322-z> (Accessed 06/18/2023). (In Engl.)
7. Krishan A.L., Rimshin V.I., Astafeva M.A., Deformability of a Volume-Compressed Concrete. In: *IOP Conference Series Materials Science and Engineering*, 2018, 463 (2), DOI:10.1088/1757-899X/463/2/022063. URL: https://www.researchgate.net/publication/330025335_Deformability_of_a_Volume-Compressed_Concrete/link/5c2a624a458515a4c703a5cb/download (Accessed 06/18/2023). (In Engl.)
8. Le T.T., Asteris P.G., Lemonis M.E. Prediction of Axial Load Capacity of Rectangular Concrete-Filled Steel Tube Columns Using Machine Learning Techniques. In: *Engineering with Computers*, 2021, 1-34, DOI:10.1007/s00366-021-01461-0. URL: https://www.researchgate.net/publication/352786005_Prediction_of_Axial_Load_Capacity_of_Rectangular_Concrete-filled_Steel_Tube_Columns_using_Machine_Learning_Techniques (Accessed 06/18/2023). (In Engl.)
9. Schneider S.P. Axially Loaded Concrete-Filled Steel Tubes. In: *Journal of Structural Engineering-ASCE*, 1998, no. 124, pp. 1125–1138. URL: <https://www.semanticscholar.org/paper/Axially-Loaded-Concrete-Filled-Steel-Tubes-Schneider/f64f2e2835ede4792be89a123a9a12234644fc6d> (Accessed 06/18/2023). (In Engl.)
10. Krishan A.L., Rimshin V.I., Shubin I.L., Astafeva M.A., Stupak A.A. Compressed Reinforced Concrete Elements Bearing Capacity of Various Flexibility, Lecture Notes in Civil Engineering, 2022, 182, pp. 283–291, DOI: 10.1007/978-3-030-85236-8_26 (Accessed 07/12/2023). (In Engl.)
11. Uy B., Tao Z., Han L.H. Behaviour of Short and Slender Concrete-Filled Stainless Steel Tubular Columns. In: *Journal of Constructional Steel Research*, 2011, Vol. 67, pp. 360–378, DOI: 10.1016/j.jcsr.2010.10.004. URL: https://www.researchgate.net/publication/241079587_Behaviour_of_short_and_slender_concrete-filled_stainless_steel_tubular_columns (Accessed 06/18/2023). (In Engl.)
12. Ahmed M., Liang Q.Q., Patel V.I., Hadi M.N.S. Experimental and Numerical Studies of Square Concrete-Filled Double Steel Tubular Short Columns under Eccentric Loading. In: *Journal Engineering Structures*, 2019, 197, p. 109419. URL: <https://vuir.vu.edu.au/39331/1/Ep39331.pdf>. (Accessed 06/18/2023). (In Engl.)
13. Han L.H., Xu C.Y., Tao Z. Behaviour of concrete Filled Stainless Steel Tubular (CFSST) Columns. In: *Journal of Constructional Steel Research*, 2018. URL: <https://www.researchgate.net/publication/323431446> (Accessed 06/18/2023). (In Engl.)
14. Krishan A.L., Troshkina E.A. Estimation of Carrying Capacity of Eccentrically Compressed Concrete-Filled Steel Tube Columns. In: *Advances of Environmental Biology*, 2014, no. 8 (7), pp. 1974–1977. URL: https://www.researchgate.net/publication/288241054_Estimation_of_carrying_capacity_of_eccentrically_compressed_concrete_filled_steel_tube_columns (Accessed 06/18/2023). (In Engl.)
15. Dyskin A.V., Estrin Y., Kanel-Belov A.J., Pasternak E. Toughening by Fragmentation – How Topology Helps. In: *Advanced Engineering Mater*, 2001, no. 3, pp. 885–888. URL: https://www.researchgate.net/publication/230317548_Toughening_by_Fragmentation-How_Topology_Helps (Accessed 06/18/2023). (In Engl.)
16. Dyskin A.V., Estrin Y., Kanel-Belov A.J., Pasternak E. Topological Interlocking of Platonic Solids: A Way to New Materials and Structures. In: *Philosophical Magazine Letters*, 2003, 83, pp. 197–203. URL: https://www.researchgate.net/publication/243406596_Topological_interlocking_of_platonic_solids_A_way_to_new_materials_and_structures (Accessed 06/18/2023). (In Engl.)
17. Dyskin, A.V., Y. Estrin, E. Pasternak, H.C. Khor and A.J. Kanel-Belov, Fracture Resistant Structures Based on Topological Interlocking with Nonplanar Contacts. In: *Advanced Engineering Mater*, 2003, no. 5, pp.116–119. URL: https://www.researchgate.net/publication/230013769_Fracture_Resistant_Structures_Based_on_Topological_Interlocking_with_Non-planar_Contacts (дата обращения 18.06.2023). (Accessed 06/18/2023). (In Engl.)
18. Dyskin A.V., Estrin Y., Pasternak E., Khor H.C., Kanel-Belov A.J. The Principle of Topological Interlocking in Extraterrestrial Construction. In: *Acta Astronautica*, 2005, 57:1, pp. 10–21. URL: https://www.researchgate.net/publication/245139582_The_principle_of_topological_interlocking_in_extraterrestrial_construction (Accessed 06/18/2023). (In Engl.)
19. Estrin, Y., Dyskin A.V., Pasternak E., Khor H.C., Kanel-Belov A.J. Topological Interlocking of Protective Tiles for Space Shuttle In: *Philosophical Magazine Letters*, 2003, no. 83, pp. 351–355. URL: https://www.researchgate.net/publication/243406608_Topological_interlocking_of_protective_tiles_for_the_space_shuttle (Accessed 06/18/2023). (In Engl.)
20. Dyskin A.V., Estrin Y., Kanel-Belov A.J., Pasternak E. Interlocking Properties of Buckyballs. In: *Physics Letters Philosophical Magazine Letters A*, 2003, 319, pp. 373–378. URL: https://www.researchgate.net/publication/229375800_Interlocking_properties_of_buckyballs (Accessed 06/18/2023). (In Engl.)
21. Bondarenko V.M., Rimshin V.I. Dissipativnaya teoriya silovogo soprotivleniya zhelezobetona [Dissipative Theory of

Force Resistance of Iron-concrete]. Moscow, Student Publ., 2015, 110 p. (In Russ.)

22. Varlamov A.A., Rimshin V.I. Modeli povedeniya betona. Obshchaya teoriya degradatsii [Models of Concrete Behavior. General Theory of Degradation], monograph. Moscow, INFRA-Moscow, Publ., 2019, 435 p. (In Russ.)

23. Rimshin V.I., Krishan A.L., Mukhametzyanov A.I. Postroenie diagrammy deformirovaniya odnoosno szhatogo betona [Constructing a Deformation Diagram of Uniaxially Compressed Concrete]. In: *Vestnik MGSU*, 2015, no. 6, pp. 23–31. (In Russ., abstr. in Engl.)

24. Karpenko N.I., Eryshev V.A., Rimshin V.I. The Limiting Values of Moments and Deformations Ratio in Strength calculations Using Specified Material Diagrams. In: *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2018, p. 032024. URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/463/3/032024/pdf> (Accessed 06/18/2023). (In Engl.)

25. Krishan A.L., Rimshin V.I., Telichenko V.I., Rakhmanov V.A., Narkevich M.Yu. Prakticheskaya realizatsiya rascheta nesushchei sposobnosti trubobetonnykh kolonn [Practical

Implementation of the Calculation of the Bearing Capacity Trumpet-Concrete Column]. In: *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Tekhnologiya tekstil'noi promyshlennosti [Proceedings of Higher Education Institutions. Textile Industry Technology]*, 2017, no. 2 (368), pp. 227–232. (In Russ., abstr. in Engl.)

26. Krishan A.L., Rimshin V.I., Troshkina E.A. Strength of Short Concrete Filled Steel Tube Columns of Annular Cross Section. In: *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2018, p. 022062. <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/463/2/022062/pdf> (Accessed 06/18/2023). (In Engl.)

27. Krishan A.L., Rimshin V.I., Zaikin A.I. Raschet prochnosti szhatykh zhelezobetonnykh elementov s kosvennym armirovaniem [Calculation Compressive Strength Reinforced Concrete Blocks with Lateral Reinforcement]. In: *Beton i zhelezobeton – vzglyad v budushchee [Concrete and Reinforced Concrete – a Look into the Future]*, Scientific papers of the III All-Russian (II International) Conference on Concrete and Reinforced Concrete, in 7 volumes, Vol. 1. Moscow, MGSU Publ., 2014, pp. 308–314. (In Russ., abstr. in Engl.)