



С. С. МОРДОВСКИЙ
Д. О. ФРАНЦЕВА

ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ВНЕЦЕНТРЕННО СЖАТЫХ ЭЛЕМЕНТОВ КОЛЬЦЕВОГО СЕЧЕНИЯ

RESEARCH OF STRESS-DEFORMED STATES OF ECCENTRALLY COMPRESSED ELEMENTS OF ANNULAR SECTION

Производится сравнение результатов исследования внецентренно сжатых железобетонных элементов кольцевого сечения по прочностным характеристикам. Производимый анализ в своей основе содержит использование нелинейной деформационной модели, которая приближает работу бетона к реальным экспериментальным условиям. Приводится сравнительный анализ результатов расчета прочности железобетонных элементов кольцевого сечения по методике, предложенной в действующем своде правил, авторской программы для определения напряженно-деформированного состояния железобетонной колонны кольцевого сечения, реализованной в программной среде MathCad, и численного эксперимента в ПК Лира-САПР. Расчеты и схемы представлены с учетом возможности проведения экспериментального исследования.

Ключевые слова: колонна кольцевого сечения, внецентренно сжатый элемент, железобетонная колонна, прочность, напряженно-деформированное состояние

В основе данной работы лежит уточнение расчета внецентренно сжатых элементов кольцевого сечения и определение их напряженно-деформированного состояния (НДС).

Большое значение на напряженно-деформированное состояние железобетонного элемента играет его форма сечения [1]. В данной работе рассматриваются колонны кольцевого

The results of the study of eccentrically compressed reinforced concrete elements of an annular section are compared in terms of strength characteristics. The analysis carried out basically contains the use of a non-linear deformation model, which brings the behavior of concrete closer to real experimental conditions. A comparative analysis of the results of calculating the strength of reinforced concrete elements of an annular section according to the method proposed in the current set of rules, the author's program for determining the stress-strain state of a reinforced concrete column of an annular section, implemented in the MathCad software environment, and a numerical experiment in the Li-ra-SAPR software package is given. Calculations and schemes are given taking into account the possibility of conducting an experimental study.

Keywords: annular section column, eccentrically compressed element, reinforced concrete column, strength, stress-strain state

сечения. Основными преимуществами этих колонн является снижение расхода бетона и стали на их производство по сравнению с колоннами круглого сечения, а также повышение механических свойств ввиду способа их изготовления.

Использование указанных в приложении Д (СП 63.13330.2018 «Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения. СНиП

52-01-2003 (с Изменением № 1)» расчетных формул для ручного расчета затруднено с математической точки зрения, так как значение относительной площади сжатой зоны бетона одновременно является как самостоятельным членом уравнения, так и переменной под знаком тригонометрической функции – синус. Из вышесказанного следует, что наименее трудозатратным вариантом решения поставленной задачи является использование программных комплексов с реализацией в них итерационных методов вычисления. К недостаткам метода, описанного в данной нормативной документации, можно отнести определение НДС лишь в предельном состоянии. Однако зачастую необходимы результаты расчётов НДС в промежуточных состояниях.

На сегодняшний момент в международной практике проектирования железобетонных конструкций используется нелинейная деформационная модель расчета, предусматривающая применение диаграмм деформирования бетона и арматуры [2–6]. Использование данного метода дает возможность с высокой точностью рассчитывать не только несущую способность, но и напряженно-деформированное состояние поперечного сечения элемента конструкции на всех стадиях загрузки [7]. При расчете по методу предельных состояний такая возможность отсутствует, а при расчетах с использованием двух- и трехлинейной диаграмм деформирования – ограничена из-за существенных различий данных диаграмм состояния действительной работе бетона, что обусловлено избыточным упрощением их представления.

В большинстве работ на данную тему авторы, предлагая более совершенные диаграммы деформирования бетона и арматуры, основываются на предложенных ранее феноменологических зависимостях, представленных в виде различных функций (полиномы, степенные, дробные и т. д.).

На сегодняшний день неисследованной остается проблема использования диаграмм одноосного сжатия (растяжения) бетона для

расчётов конструкций, находящихся в сложноподвижном состоянии. Многие авторы научно-исследовательских работ, считающие весьма весомыми как качественные, так и количественные различия диаграмм одноосного сжатия и сложноподвижного состояния, отмечают необходимость изменения диаграммы деформирования бетона при осевом сжатии перед непосредственным использованием в расчетах [8].

Для автоматизации процесса расчёта внецентренно сжатых железобетонных элементов кольцевого сечения в программе MathCad был разработан алгоритм с применением встроенных средств программирования, который представляет собой отдельную расчётную программу. Схема распределения внутренних и внешних усилий в сечении элемента представлена на рис. 1.

В алгоритме расчетной программы в качестве диаграммы деформирования бетона использовалась экспоненциальная зависимость, первоначально предложенная профессором Г.В. Мурашкиным для изгибаемых элементов [3], затем адаптированная для внецентренно сжатых элементов [4, 5].

Расчет происходит без учета влияния гибкости элемента, ввиду того что образец является жестким коротким. Исходные данные заносятся в форму заполнения (рис. 2), после чего происходит итерационный расчет и программа выводит результаты в форме таблицы (рис. 3), которая демонстрирует все необходимые значения величин. Предложенная методика позволяет значительно ускорить время расчета, более того, все изменяющиеся величины вычисляются не в одной заданной точке, а по мере изменения нагрузки.

Анализ результатов вычислений по предложенной методике проводился в сравнении с результатами расчета по формулам приложения Д (СП 63.13330.2018) и расчетами в ПК Лира-САПР, где были смоделированы два образца, которые загружались продольными силами с различными значениями эксцентриситетов (рис. 4). Для моделирования бетона применя-

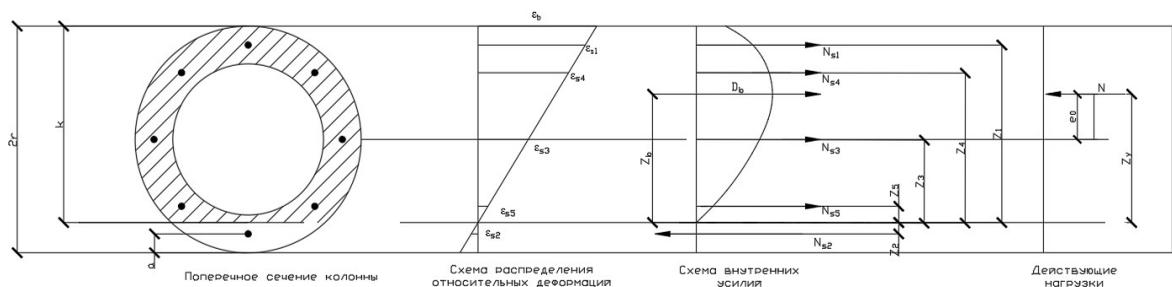


Рис. 1. Схема расчётной модели внецентренно сжатого железобетонного элемента кольцевого сечения

Исходные данные:

$R =$	м	внешний радиус сечения колонны
$R_{\text{внутр}} =$	м	внутренний радиус сечения колонны
$A_s =$	м ²	площадь сечения одного стержня продольной арматуры
$e_0 =$	м	эксцентриситет внешнего усилия N
$R_b =$	МПа	расчётное сопротивление бетона на осевое сжатие
$E_b =$	МПа	начальный модуль упругости бетона
$R_s =$	МПа	расчётное сопротивление продольной арматуры на растяжение
$E_s =$	МПа	модуль упругости продольной арматуры
$b=r - R_{\text{внутр}} =$	м	толщина кольца
$a=b/2=$	м	расстояние от края колонны до центра тяжести арматурного стержня

Рис. 2. Форма заполнения данных для расчета

ϵ_b	k	ϵ_{s1}	ϵ_{s2}	ϵ_{s3}	ϵ_{s4}	ϵ_{s5}	N_{s1}	N_{s2}	N_{s3}	N_{s4}	N_{s5}	D_b	N	Z_n	Z_b	Z_1	Z_2	Z_3	Z_4	Z_5	M_b	M
0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Рис. 3. Результаты расчета

лись конечные элементы (КЭ) Типа 234 – физически нелинейный универсальный пространственный шестиузловой изопараметрический

КЭ и Типа 236 – физически нелинейный универсальный пространственный восьмиузловой изопараметрический КЭ. Для арматуры в модели использовался Тип 210 – физически нелинейный универсальный пространственный стержневой КЭ. Для равномерного распределения нагрузки по сечению на концах колонн были замоделированы стальные пластины толщиной 5 см, для которых в модели применялись следующие типы конечных элементов: Тип 34 – универсальный пространственный шестиузловой изопараметрический КЭ, Тип 36 – универсальный пространственный восьмиузловой изопараметрический КЭ.

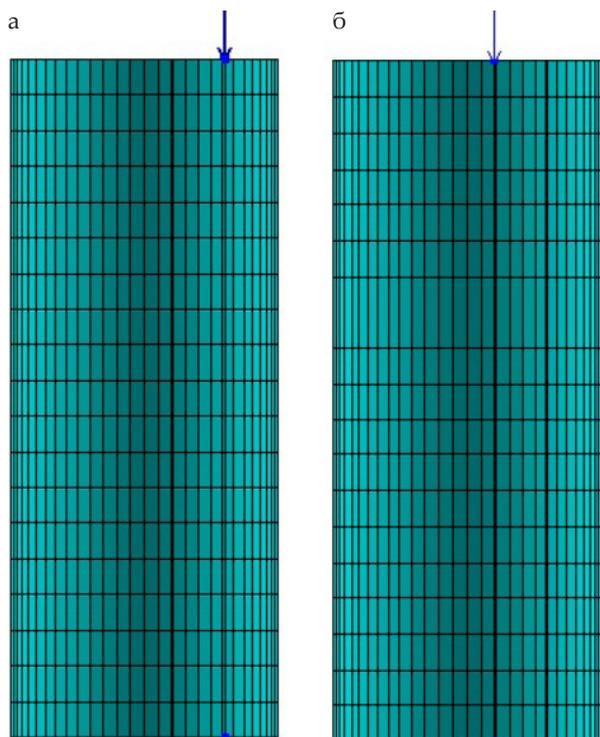


Рис. 4. Образцы численного эксперимента:
а – колонна К1 при значении эксцентриситета 9 см;
б – колонна К2 при значении эксцентриситета 3 см

Образцы колонн К1, К2 (см. рис. 4) имеют внешний и внутренний радиусы сечения 15 и 10 см соответственно, выполнены из бетона класса по прочности В35 и армируются восемью стержнями диаметром 10 мм класса А500. Длина образцов составляет 0,6 м. Расстояние от края колонны до центра тяжести арматурного стержня равно 2,5 см. Защитный слой бетона составляет 2 см. Эксцентриситет приложения продольной нагрузки для колонны К1 был принят равным 9 см, для колонны К2 – 3 см. При моделировании образцов колонн К1, К2 использовалась экспоненциальная диаграмма деформирования как для бетона, так и для арматуры. Параметры нелинейности бетона и арматуры и их физические характеристики представлены на рис. 5–7.

Расчет с использованием формул приложения Д (СП 63.13330.2018) реализован по

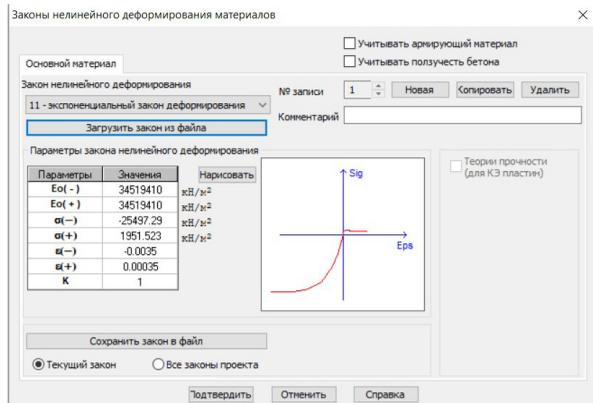


Рис. 5. Диаграмма деформирования бетона

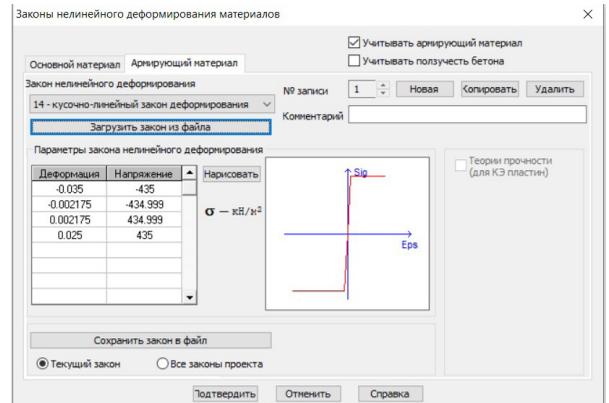


Рис. 6. Диаграмма деформирования арматуры

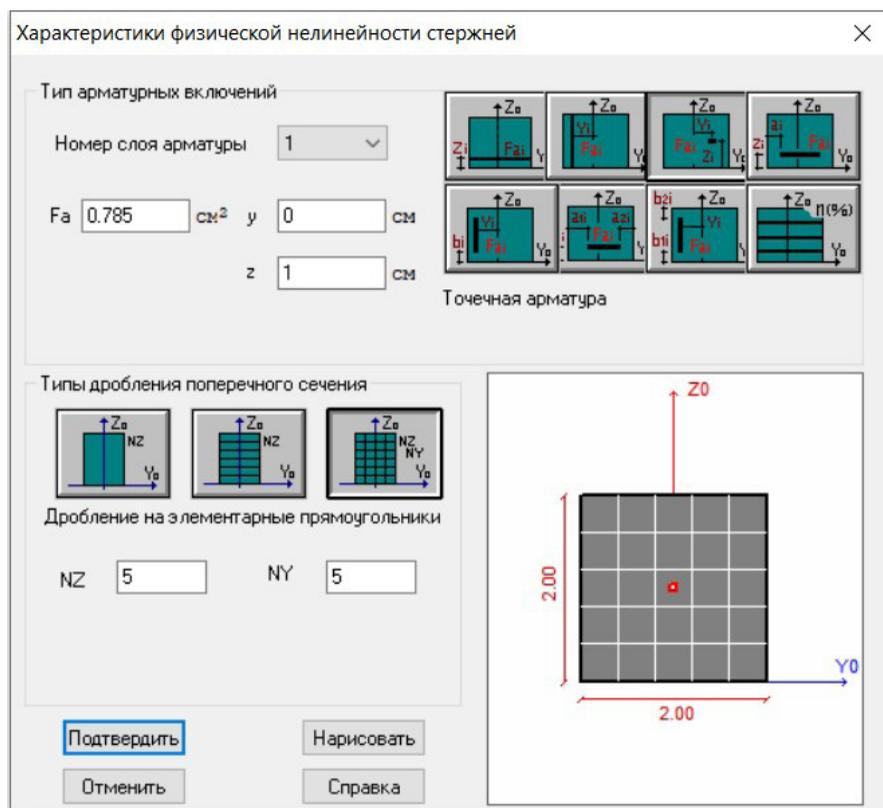


Рис. 7. Площадь арматурного стержня

Сравнение результатов расчёта

Шифр колонны	Методика расчета	Разрушающая нагрузка, кН
K1	Лира-САПР	478,35 (-4,24 %)
	MathCad, авторская программа	488,155 (-2,28 %)
	СП 63.13330.2018, приложение Д	499,53
K2	Лира-САПР	791,57 (-4,12 %)
	MathCad, авторская программа	778,589 (-5,7 %)
	СП 63.13330.2018, приложение Д	825,62

методу предельных усилий. Образцы в ПК Лира-САПР рассчитаны по нелинейной деформационной модели, реализованной в этом же своде правил. В программной среде MathCad также выполняется расчет с применением диаграмм деформирования материалов.

Анализируя результаты исследования, можно сделать следующие **выводы**:

1. Разработан основанный на нелинейной деформационной модели алгоритм, позволяющий определять напряженно-деформированное состояние и прочность железобетонных элементов кольцевого сечения.

2. На основании данного алгоритма в программной среде MathCad составлена программа «Расчёт прочности и определение напряженно-деформированного состояния (НДС) внецентренно сжатых железобетонных элементов кольцевого сечения».

3. Моделирование экспериментальных образцов в ПК Лира-САПР и их расчет в программной среде MathCad показали близкие значения разрушающих нагрузок (см. таблицу) и схожесть характера напряженно-деформированного состояния.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Веретенников В.И., Бармотин А.А. О влиянии размеров и формы сечения элементов на диаграмму деформирования бетона при внецентренном сжатии // Бетон и железобетон. 2000. № 5. С. 27–30.
2. Карпенко Н.И., Соколов Б.С., Радайкин О.В. Анализ и совершенствование криволинейных диаграмм деформирования бетона для расчета железобетонных конструкций по деформационной модели // Промышленное и гражданское строительство. 2013. № 1. С. 25–27.
3. Мурашкин Г.В., Мурашкин В.Г. Моделирование диаграммы деформирования бетона и схемы напряженно-деформированного состояния // Известия высших учебных заведений. Строительство. 1997. № 10. С. 4–6.
4. Мурашкин Г.В., Мордовский С.С. Применение диаграмм деформирования для расчёта несущей способности внецентренно сжатых железобетонных элементов // Жилищное строительство. 2013. № 3. С. 38–40.
5. Мордовский С.С. Совершенствование расчёта прочности внецентренно сжатых железобетонных элементов: дис. ... канд. техн. наук. Казань, 2013. 214 с.
6. Тошин Д.С., Анисимова М.П. Поиск оптимального способа реализации итерационного приближения при расчете по деформационной модели // Научное обозрение. 2016. № 17. С. 25–29.
7. Мордовский С.С., Давликамов Р.И. Напряженно-деформированное состояние внецентренно сжатых железобетонных колонн круглого сечения // Градостроительство и архитектура. 2018. Т. 8, № 1. С. 4–9. DOI: 10.17673/Vestnik.2018.01.1.
8. Крусь Ю.А. Трансформирование диаграмм деформирования бетона при центральном сжатии и растяжении // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2008. № 7. С. 113–122.

REFERENCES

1. Veretennikov V.I., Barmotin A.A. On the influence of the dimensions and shape of the section of elements on the diagram of concrete deformation during off-center compression. *Beton i zhelezobeton* [Concrete and Reinforced Concrete], 2000, no. 5, pp. 27–30. (in Russian)
2. Karpenko N.I., Sokolov B.S., Radaykin O.V. Analysis and improvement of curvilinear concrete deformation diagrams for calculation of reinforced concrete structures according to the deformation model. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo* [Industrial and Civil Construction], 2013, no. 1, pp. 25–27. (in Russian)
3. Murashkin G.V., Murashkin V.G., Modeling of concrete deformation diagram and scheme of stress-strain state. *Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij. Stroitel'stvo* [Izvestiya of Higher Educational Institutions. Construction], 1997, no. 10, pp. 4–6. (in Russian)
4. Murashkin G.V., Mordovskiy S.S. Application of deformation diagrams for calculation of bearing capacity of extra-centered compressed reinforced concrete elements. *Zhilishchnoe stroitel'stvo* [Housing Construction], 2013, no. 3, pp. 38–40. (in Russian)
5. Mordovskiy S.S. *Sovershenstvovanie raschyota prochnosti vnecentrenno szhatykh zhelezobetonnykh elementov. Kand, Diss.* [Improving the calculation of the strength of extra-centered compressed reinforced concrete elements. Ph.Doct, Diss]. Kazan, 2013. 214 p.
6. Toshin D.S., Anisimova M.P. Search for optimal method of implementation of iterative approximation when calculating by deformation model. *Nauchnoe obozrenie* [Scientific Review], 2016, no. 17, pp. 25–29. (in Russian)
7. Mordovsky S.S., Davlikamov R.I. Stress-strain state of eccentrically compressed reinforced concrete columns of circular cross-section. *Gradostroitel'stvo i arhitektura* [Urban Construction and Architecture], 2018. V. 8, no. 1, p. 4–9. (in Russian) DOI: 10.17673/Vestnik.2018.01.1
8. Krus Yu.A. Transformation of concrete deformation diagrams during central compression and tension. *Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij. Stroitel'stvo* [News of Higher Educational Institutions. Construction], 2008, no. 7. pp. 113–122. (in Russian)

Об авторах:

МОРДОВСКИЙ Сергей Сергеевич

кандидат технических наук, доцент кафедры
железобетонных конструкций
Самарский государственный технический университет
Академия строительства и архитектуры
443100, Россия, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244
E-mail: qaer1@yandex.ru

MORDOVSKY Sergey S.

PhD in Engineering Science, Associate Professor of the
Reinforced Concrete Structures Chair
Samara State Technical University
Academy of Civil Engineering and Architecture
443100, Russia, Samara, Molodogvardeyskaya str., 244
E-mail: qaer1@yandex.ru

ФРАНЦЕВА Дарья Олеговна

магистрант факультета промышленного
и гражданского строительства
Самарский государственный технический университет
Академия строительства и архитектуры
443100, Россия, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244

FRANTSEVA Daria O.

Master's Degree Student of the Faculty of Industrial and
Civil Engineering
Samara State Technical University
Academy of Civil Engineering and Architecture
443100, Russia, Samara, Molodogvardeyskaya str., 244

Для цитирования: Мордовский С.С., Францева Д.О. Исследование напряженно-деформированного состояния внецентренно сжатых элементов кольцевого сечения // Градостроительство и архитектура. 2022. Т. 12, № 2. С. 4–9. DOI: 10.17673/Vestnik.2022.02.1.

For citation: Mordovsky S.S., Frantseva D.O. Research of Stress-Deformed States of Eccentrically Compressed Elements of Annular Section. *Gradostroitel'stvo i arhitektura* [Urban Construction and Architecture], 2022, vol. 12, no. 2, pp. 4–9. (in Russian) DOI: 10.17673/Vestnik.2022.02.1.

ПОДПИСКА – 2022

на январь–декабрь
в «Объединенном каталоге «Пресса России»
на сайтах www.pressa-rf.ru и www.akc.ru,

Уважаемые читатели!
Обратите внимание, что с 1 сентября 2021 г.
проводится подписная кампания на журналы
Самарского государственного технического
университета на 2022 год

18106 Вестник Самарского государственного технического университета.
Серия «Технические науки»

18107 Вестник Самарского государственного технического университета.
Серия «Психолого-педагогические науки»

18108 Вестник Самарского государственного технического университета.
Серия «Физико-математические науки»

41340 Вестник Самарского государственного технического университета.
Серия «Философия»

70570 Градостроительство и архитектура

Условия оформления подписки вы найдете
на сайтах www.pressa-rf.ru и www.akc.ru,