



С.С. МОРДОВСКИЙ
Р.И. ДАВЛИКАМОВ

НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ ВНЕЦЕНТРЕННО СЖАТЫХ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОЛОНН КРУГЛОГО СЕЧЕНИЯ

STRESS-STRAIN STATE OF ECCENTRICALLY COMPRESSED REINFORCED CONCRETE COLUMNS
OF CIRCULAR CROSS-SECTION

Анализируются теоретические исследования железобетонных внецентренно сжатых колонн круглого сечения по показателям прочности. Данные исследования опираются на использование нелинейной деформационной модели, которая приближает работу бетона к реальным экспериментальным условиям. Приводится сравнительный анализ результатов расчета прочности железобетонных колонн круглого сечения по методике, предложенной в действующем своде правил, авторской программы для определения напряженно-деформированного состояния железобетонной колонны круглого сечения, реализованной в программной среде MathCad. Сравниваются результаты численного эксперимента в виде конечно-элементной модели в программном комплексе Лира-САПР с использованием нелинейной деформационной модели. Расчеты и схемы приведены с учетом возможности проведения экспериментального исследования.

Theoretical studies of reinforced concrete eccentrically compressed columns of circular cross-section on strength indexes are analyzed. These studies rely on the use of a nonlinear deformation model that approximates the work of concrete to real experimental conditions. A comparative analysis of the results of calculating the strength of reinforced concrete columns of circular cross-section is carried out according to the methodology proposed in the current set of rules, is the author's program for determining the stress-strain state of a reinforced concrete column of circular cross-section implemented in the MathCad software environment. The results of a numerical experiment are compared in the form of a finite-element model in the Lira-CAD program complex using a nonlinear deformation model. Calculations and schemes are given taking into account the possibility of conducting an experimental study.

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

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

Основной целью работы является совершенствование расчета железобетонных колонн круглого сечения и определение их напряженно-деформированного состояния (НДС).

Как известно, форма сечения играет значительную роль в напряженно-деформированном состоянии железобетонного элемента [1]. В исследовании

рассматривалось круглое сечение колонн. Одно из важнейших преимуществ такого сечения заключается в том, что при смещении эксцентриситета от оси приложения нагрузки площадь сжатой зоны бетона остается практически неизменной. При этом железобетонные колонны круглого поперечного сечения оказываются в более выгодном положении при

возникающем случае косога внецентренного сжатия в отличие от колонн прямоугольного сечения.

Применение приведенных в справочном приложении Д (СП 63.13330.2012. Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения. Актуализированная редакция СНиП 52-01-2003) расчётных формул для ручного инженерного счёта осложнено тем, что значение относительной площади сжатой зоны бетона одновременно входит в уравнения как самостоятельный член и как переменная под знаком синуса. Поэтому для решения данной задачи предпочтительно применение вычислительной техники с организацией итерационных циклов. К недостаткам данного метода расчета можно отнести то, что анализ сечения выполняется только в предельном состоянии, без возможности определения НДС в иных состояниях.

На сегодняшний день нелинейная деформационная модель расчёта, предусматривающая использование диаграмм деформирования бетона и арматуры [2–5], внедрена в различные международные и национальные нормы проектирования железобетонных конструкций. Данный подход к расчёту внецентренно сжатых железобетонных элементов позволяет достаточно точно определить не только несущую способность, но и напряжённо-деформированное состояние поперечного сечения элемента конструкции на всех стадиях загрузки. При расчёте по методу предельных усилий такая возможность отсутствует, а при расчётах с применением

двух- и трехлинейной диаграмм деформирования – ограничена ввиду несоответствия данных диаграмм состояния действительной работе бетона из-за чрезмерного упрощения их представления.

В работах большинства авторов в качестве диаграмм деформирования бетона и арматуры предлагались или совершенствовались ранее предложенные феноменологические зависимости в виде полиномов, степенных, дробных и других функций.

В настоящее время неизученным остаётся вопрос о возможности непосредственного применения диаграмм одноосного сжатия (растяжения) бетона для расчётов конструкций, находящихся в сложнапряжённом состоянии. Исследователи, придерживающиеся мнения о различии диаграмм одноосного сжатия и сложнапряжённого состояния количественно и качественно, указывают на необходимость трансформации диаграмм деформирования бетона при осевом сжатии перед непосредственным использованием в расчётах [6].

Для автоматизации процесса расчета железобетонных колонн круглого сечения вычисления производились в программном комплексе MathCad. В данной среде был разработан алгоритм с применением методов программирования. Предложенный алгоритм представляет собой отдельную программу, которая позволяет производить расчет железобетонных колонн круглого сечения. Расчетная схема для составления уравнений равновесия представлена на рис. 1.

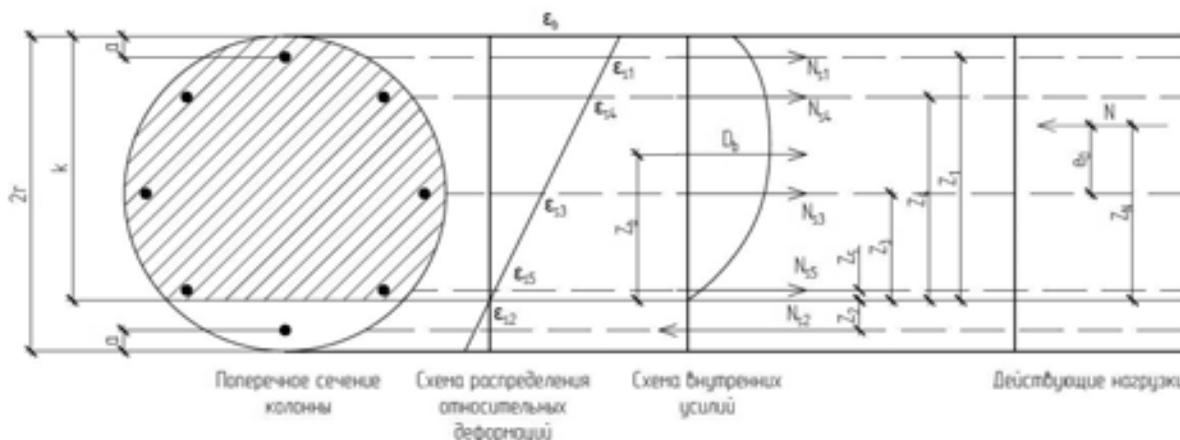


Рис. 1. Схема расчетной модели внецентренно сжатого железобетонного элемента

В алгоритме расчетной программы в качестве диаграммы деформирования бетона использовалась экспоненциальная зависимость, первоначально предложенная профессором Г.В. Мурашкиным для изгибаемых элементов, затем адаптированная для внецентренно сжатых элементов [3, 4]. Расчет происходит без учета влияния гибкости элемента. Исходные данные заносятся в форму заполне-

ния (рис. 2), после чего происходит итерационный расчет и программа выводит результаты в форме таблицы (рис. 3), которая наглядно показывает все интересующие нас величины. Предложенная методика позволяет значительно ускорить время расчета, более того, все изменяющиеся величины вычисляются не в одной заданной точке, а по мере изменения нагрузки.

ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ:

$r = r$	см	радиус сечения колонны
$a = a$	см	расстояние от края колонны до центра тяжести арматурного стержня
$A_s = A_s$	см ²	площадь одного стержня продольной арматуры
$e_0 = e_0$	см	эксцентриситет внешнего усилия N
$R_b = R_b$	МПа	расчетное сопротивление бетона на осевое сжатие
$E_b = E_b$	МПа	начальный модуль упругости бетона при сжатии
$R_s = R_s$	МПа	расчетное сопротивление арматуры на растяжение
$E_s = E_s$	МПа	модуль упругости продольной арматуры

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

Апробация результатов вычислений по предложенной методике проводилась путем их сравнения с результатами расчета по формулам приложения Д (СП 63.13330.2012). В программном комплексе Лира-САПР 2013 были замоделированы два образца, которые загружались продольными силами с различными значениями эксцентриситетов (рис. 4). Для моделирования бетона применялись конечные элементы 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.

Образцы колонн K1, K2 (см. рис. 4) имеют радиус сечения 15 см и армируются восемью стержнями диаметром 10 мм. Длина образцов составляет 1 м. Расстояние от края колонны до центра тяжести арматурного стержня составляет 3 см. Эксцентриситет приложения продольной нагрузки для колонны K1 был принят равным 3 см, для колонны K2 – 10 см.

При моделировании образцов колонн K1, K2 использовалась экспоненциальная диаграмма деформирования как для бетона, так и для арматуры. Параметры нелинейности бетона и арматуры и их физические характеристики представлены на рис. 5 и 6.

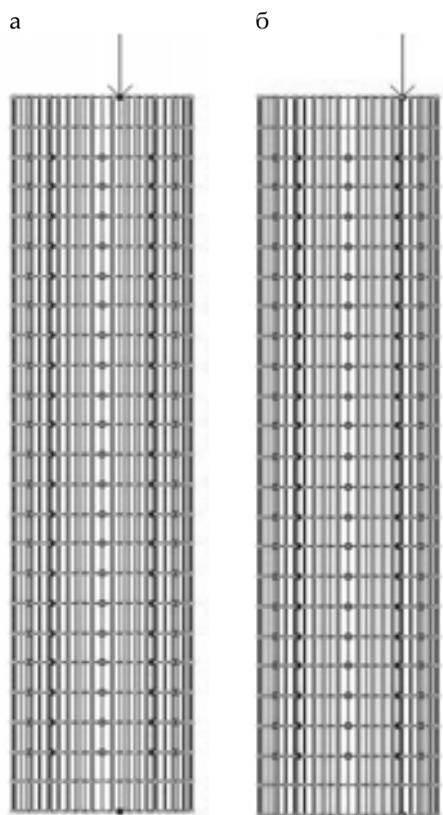


Рис. 4. Образцы численного эксперимента: а – колонна K1 при значении эксцентриситета 3 см; б – колонна K2 при значении эксцентриситета 10 см

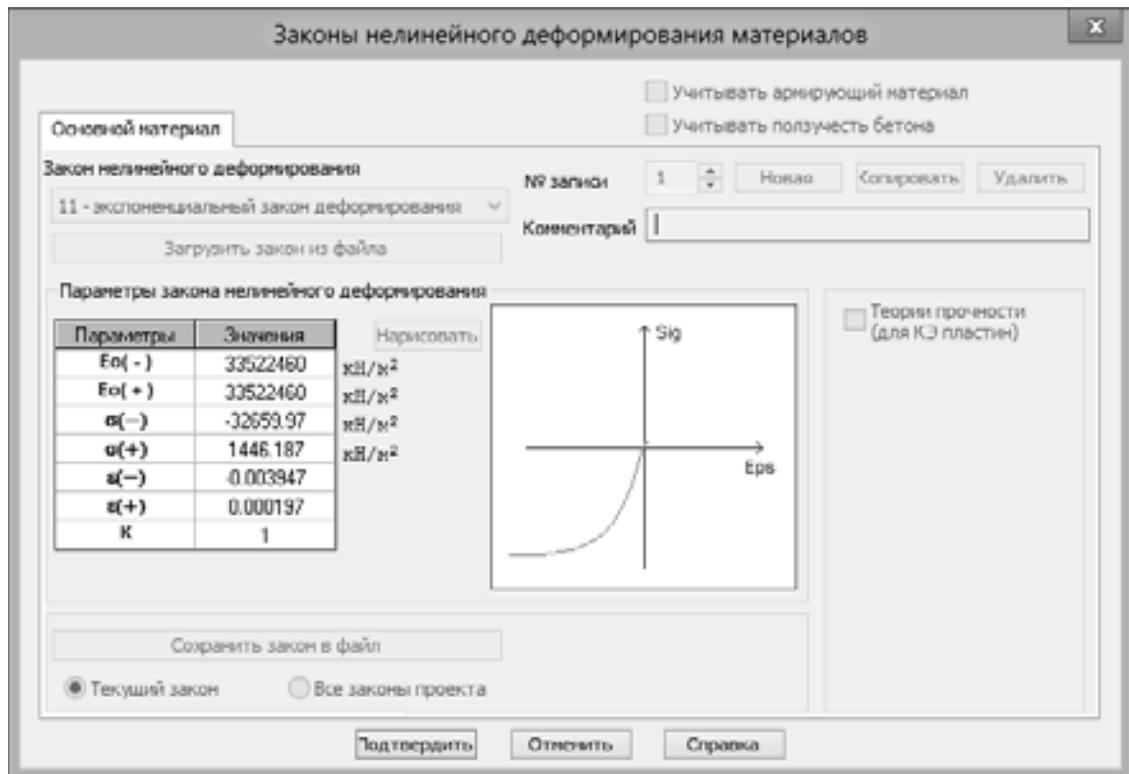


Рис. 5. Параметры нелинейности бетона (физические характеристики бетона)

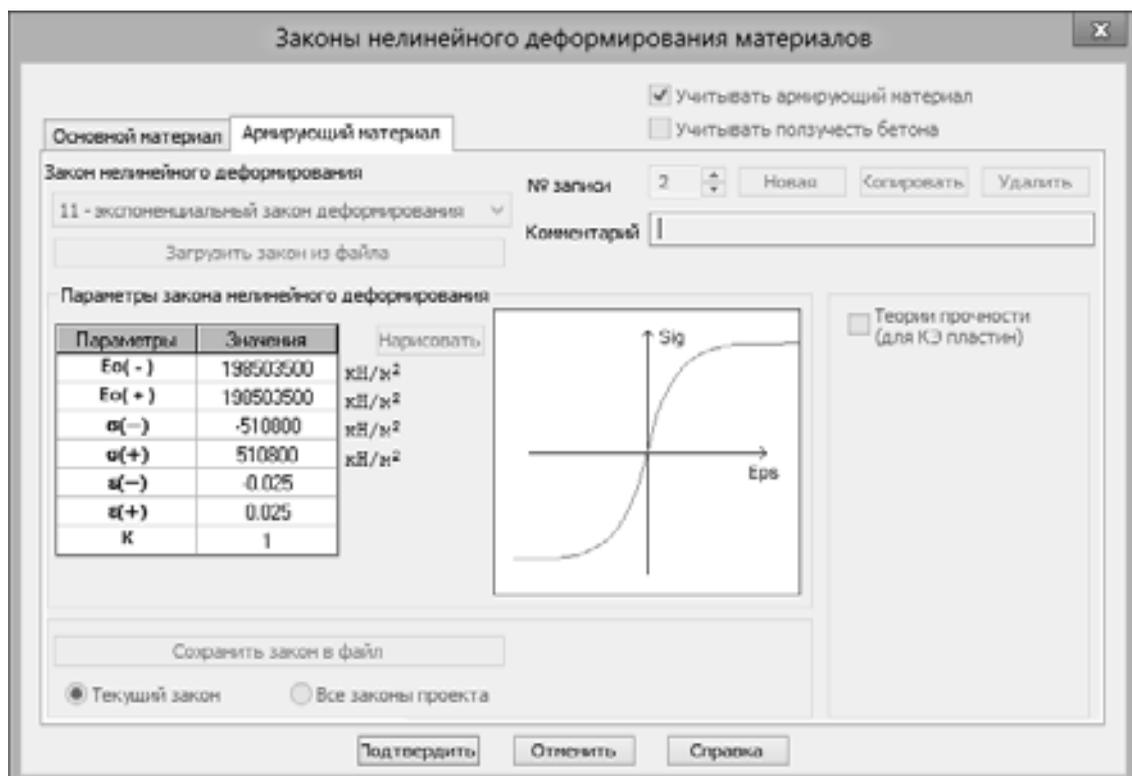


Рис. 6. Параметры нелинейности арматуры (физические характеристики арматуры)

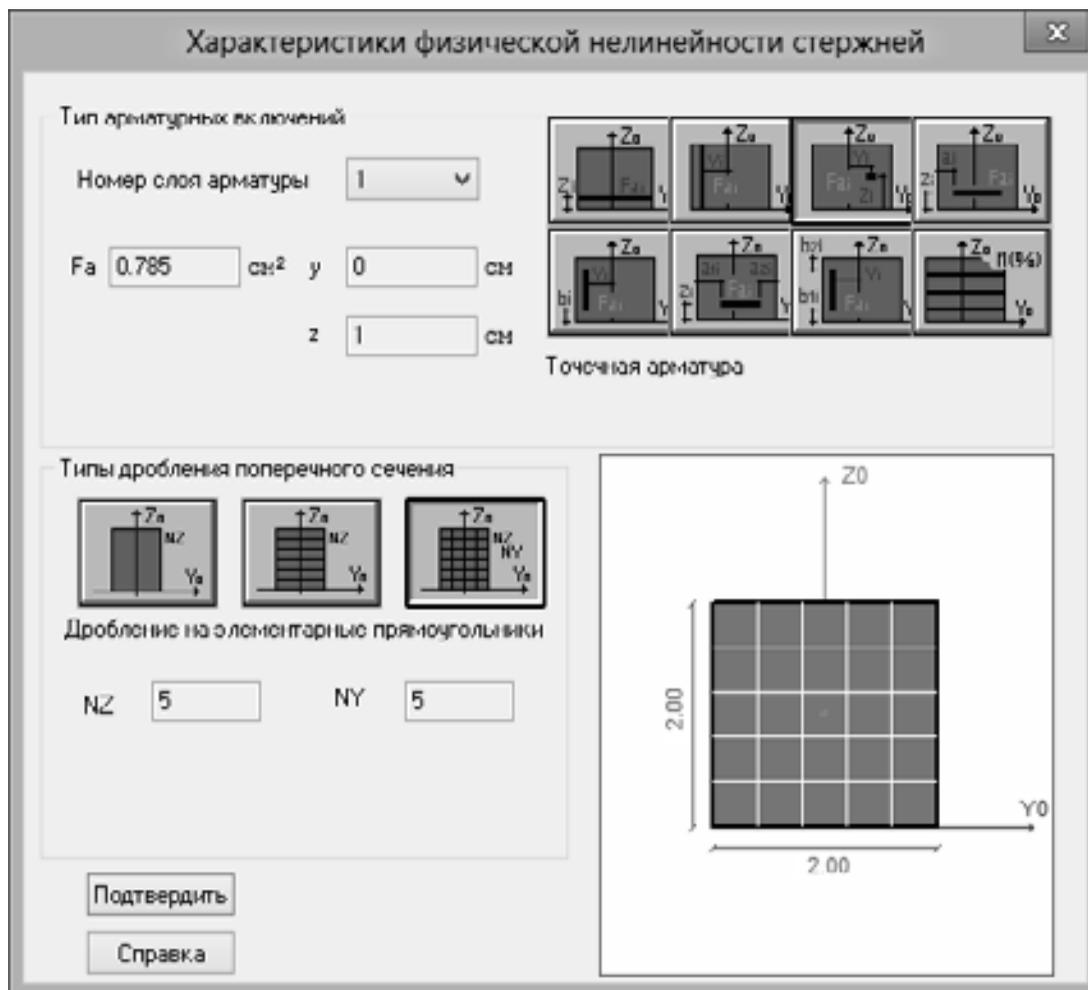


Рис. 6. (Окончание)

Сводная таблица результатов теоретического исследования

Шифр колонны	Методика расчета	Разрушающая нагрузка, кН
K1	Лира-Сапр 2013	2014 (5,2 %)
	СП 63.13330.2012, приложение Д	2037,00 (6,4 %)
	MathCad, авторская программа	1913,30
K2	Лира-Сапр 2013	967,50 (10 %)
	СП 63.13330.2012, приложение Д	912,00 (3,7 %)
	MathCad, авторская программа	879,00

Анализируя результаты исследования, можно сделать следующие **выводы**. Разработан основанный на нелинейной деформационной модели алгоритм, позволяющий определять напряженно-деформированное состояние и прочность железобетонных колонн круглого сечения. На основании данного алгоритма в программной среде MathCad составлена программа

«Расчёт прочности и определение напряженно-деформированного состояния (НДС) внецентренно сжатых железобетонных колонн круглого сечения». Моделирование экспериментальных образцов в Лира-САПР 2013 показало идентичность характера напряженно-деформированного состояния с разработанной расчетной программой (см. таблицу).

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., Мордовский С.С.* Применение диаграмм деформирования для расчёта несущей способности внецентренно сжатых железобетонных элементов // Жилищное строительство. 2013. №3. С. 38–40.
4. *Мордовский С.С.* Совершенствование расчёта прочности внецентренно сжатых железобетонных элементов: дис. ... канд. техн. наук. Казань, 2013. 214 с.
5. *Тошин Д.С., Анисимова М.П.* Поиск оптимального способа реализации итерационного приближения при расчете по деформационной модели // Научное обозрение. 2016. №17. С. 25–29.
6. *Крусь Ю.А.* Трансформирование диаграмм деформирования бетона при центральном сжатии и растяжении // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2008. №7. С. 113–122.

Об авторах:

МОРДОВСКИЙ Сергей Сергеевич
доцент кафедры строительных конструкций
Самарский государственный технический университет
Академия строительства и архитектуры
443001, Россия, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 194

MORDOVSKY Sergey S.
Associate Professor of the Building Structures Chair
Samara State Technical University
Academy of Civil Engineering and Architecture
443001, Russia, Samara, Molodogvardeyskaya str., 194
E-mail: qaer1@yandex.ru

ДАВЛИКАМОВ Рустам Исмагильевич
магистрант
Самарский государственный технический университет
Академия строительства и архитектуры
443001, Россия, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 194

DAVLIKAMOV Rustam I.
Master's Degree Student
Samara State Technical University
Academy of Civil Engineering and Architecture
443001, Russia, Samara, Molodogvardeyskaya str., 194

Для цитирования: *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.

For citation: *Mordovsky S.S., Davlikamov R.I.* Stress-strain state of eccentrically compressed reinforced concrete columns of circular cross-section // Urban construction and architecture. 2018. V.8, 1. Pp. 4-9. DOI: 10.17673/Vestnik.2018.01.1.