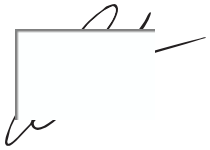
На правах рукописи



ПЛЮСНИН Михаил Геннадиевич

ОБЕСПЕЧЕННОСТЬ НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ СЖАТЫХ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ В УСЛОВИЯХ ЗАМОРАЖИВАНИЯ И ОТТАИВАНИЯ

Специальность:
2.1.1. Строительные конструкции, здания и сооружения

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2022

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет».

Научный руководитель: кандидат технических наук, доцент
Попов Владимир Мирович

Официальные оппоненты: **Пинус Борис Израилевич,**
доктор технических наук, профессор,
ФГБОУ ВО «Иркутский национальный исследовательский технический университет», кафедра «Строительное производство» профессор;

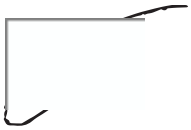
Бирюков Юрий Александрович,
кандидат технических наук,
ФГКВОУ ВО «Военная академия материально-технического обеспечения имени генерала армии А. В. Хрулёва», 7 кафедра (управления строительством и эксплуатацией объектов военной инфраструктуры), заместитель начальника кафедры;

Ведущая организация: **ФГБОУ ВО «Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I».**

Защита состоится «09» февраля 2023 года в 13:00 часов на заседании диссертационного совета 24.2.380.01 при ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет» по адресу: 190005, Санкт-Петербург, 2-я Красноармейская ул., д. 4, зал заседаний диссертационного совета (аудитория №220 главного корпуса). Тел./Факс: (812) 316-58-73; E-mail: rector@spbgasu.ru

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет» и на сайте https://dis.spbgasu.ru/specialtys/personal/plyusnin-mihail-gennadievich

Автореферат разослан «05» декабря 2022 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета  Попов Владимир Мирович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

Важной характеристикой строительных конструкций является их надёжность, основной причиной снижения которой является деградация материала под влиянием нагрузок и воздействий.

Исходя из географического положения нашей страны существенным фактором, вызывающим деградацию бетона, является действие низких и знакопеременных температур. Северная строительно-климатическая зона занимает более половины территории России. Внецентренно сжатые железобетонные элементы широко используются в строительстве, следовательно, исследование воздействия знакопеременных температур на их надёжность является актуальной задачей.

Степень разработанности темы исследования

Вопросы надёжности строительных конструкций исследовались Гвоздевым А. А., Залесовым А. С., Стрелецким Н. С., Болотиным В. В, Ржаницыным А. Р., Везикари Е., Лычевым А. С., Райзером В. Д., Снаркисом Б. И., Складневым Н. Н., Суховым Ю. Д., С. А. Тимашевым, В. И. Колчуновым, А. Г. Тамразяном, Д. В. Кузевановым, А. С. Махно и другими учёными. Проблемам работы железобетонных конструкций в условиях холодного климата и знакопеременных температур посвящены труды О. Я. Берга., В. О. Алмазова, Н. Д. Голубых, В. Б. Гусеева, А. М. Максимова, В. М. Москвина, С. Н. Леоновича, Б. И. Пинуса, Н. К. Розенталя, В. Ф. Степановой, Г. Г. Цынкина, А. С. Файвусовича и других исследователей. Использование диаграммных методов расчёта железобетонных конструкций рассматривались Н. И. Карпенко, Мурашкиным Г. В., Т. А. Мухамедиевым, О. В. Радайкиным и др.

Надёжность строительных конструкций при их расчёте обеспечивается на основе метода предельных состояний, учитывающего вероятностную природу исходных данных за счёт коэффициентов надёжности и нормируемой обеспеченности расчётных значений нагрузок и характеристик материалов. В соответствии с СП 63.13330.2018 основным методом расчёта прочности элементов ЖБК по нормальным сечениям, является нелинейная деформационная модель (диаграммный метод). Используются диаграммы материалов для кратковременного действия нагрузки, строящиеся по расчётным значениям прочностных и деформационных характеристик материалов. Обеспеченность расчётных значений деформационных характеристик в нормативных документах не определена, что вносит неопределённость в обеспеченность результатов расчётов.

Воздействие циклов замораживания и оттаивания (ЦЗО) при расчёте несущей способности диаграммными методами в соответствии с нормами учитывается понижающим коэффициентом к расчётному сопротивлению бетона. При этом в нормативных документах отсутствуют значения коэффициентов к прочностным и деформационным характеристикам бетона после воздействия ЦЗО при кратковременном действии нагрузки.

В работах Пинуса Б. И., Леоновича С. Н., Хомяковой И. В., Черных И. В., Sun Ming, Yang Xiaolin, Zhang Xuhui и других показано, что воздействие ЦЗО влияет на статистические распределения прочностных и деформационных характеристик бетона, что в действующей методике расчёта несущей способности не учитывается.

Таким образом, **основной научной гипотезой** работы является то, что статистические распределения прочностных и деформационных характеристик бетона и их трансформация под воздействием ЦЗО влияют на несущую способность железобетонных конструкций и на обеспеченность результатов её расчёта.

Целью работы является повышение надёжности внецентренно сжатых железобетонных элементов, в том числе, при воздействии на них ЦЗО.

Для достижения этой цели решаются следующие задачи:

1. Исследовать полные диаграммы $\sigma - \varepsilon$ бетона при одноосном сжатии до воздействия ЦЗО, а также их трансформацию в результате воздействии ЦЗО.

2. В рамках вероятностного подхода разработать алгоритм расчёта внецентренно сжатых железобетонных элементов учитывающий изменчивость прочностных и деформационных характеристик материалов.

3. По результатам эксперимента с помощью полученного алгоритма выявить факторы, влияющие на распределение несущей способности по нормальному сечению с учётом ЦЗО.

4. Оценить обеспеченность результатов расчёта несущей способности по нормальному сечению, выполненного по действующим нормам, с учётом воздействия ЦЗО. При необходимости разработать предложения по повышению их обеспеченности.

5. Разработать предложения по конструированию внецентренно сжатых железобетонных элементов с учётом воздействия ЦЗО.

Объект исследования: внецентренно-сжатый железобетонный элемент загруженный кратковременной нагрузкой в условиях ЦЗО.

Предмет исследования: статистические характеристики несущей способности внецентренно-сжатого железобетонного элемента по нормальному сечению с учётом воздействия ЦЗО.

Область исследования соответствует требованиям Паспорта научной специальности ВАК – 2.1.1. Строительные конструкции, здания и сооружения, пункт 3 «Развитие теории и методов оценки напряжённого состояния, живучести, риска, надёжности, остаточного ресурса и сроков службы строительных конструкций, зданий и сооружений, в том числе при чрезвычайных ситуациях, особых и запроектных воздействиях, обоснование критериев приемлемого уровня безопасности».

Научная новизна исследования состоит в:

1. Получены новые результаты о влиянии прочностных и деформационных характеристик бетона на напряжённое состояние железобетонных конструкций,

на основе которых сформулированы предложения по коррекции расчётного значения предельных деформаций бетона при сжатии, обеспечивающие надежность этих конструкций в специфических (неблагоприятных) условиях эксплуатации;

2. Разработан метод расчета прочности подвергаемых ЦЗО внецентренно-сжатых железобетонных конструкций с требуемой обеспеченностью, учитывающий статистическую изменчивость прочностных и деформационных свойств бетона;

3. Установлено влияние уровня армирования, эксцентриситета равнодействующей продольных сил на надежность внецентренно-сжатых элементов, подвергаемых попеременному замораживанию и оттаиванию.

4. Установлено влияние циклов замораживания и оттаивания на снижение предельных деформаций бетона класса В30 при кратковременных воздействиях разрушающей нагрузки.

Теоретическая значимость работы состоит в развитии подхода комплексного учёта случайного характера прочностных и деформационных характеристик бетона при расчётах несущей способности железобетонных конструкций в вероятностной и детерминированной постановке, в том числе при воздействии ЦЗО. Результаты проведённого эксперимента дополняют имеющиеся данные о статистическом распределении прочностных и деформативных характеристик бетона.

Практическая значимость работы состоит заключается в возможности применения разработанного алгоритма расчёта внецентренно сжатых железобетонных элементов в вероятностной постановке с учётом изменчивости прочностных и деформационных характеристик материалов и их корреляции; корректировке расчётного значения предельных деформаций бетона, позволяющей повысить обеспеченность результатов расчётов несущей способности внецентренно сжатых железобетонных элементов по нормальному сечению, в том числе при воздействии циклов замораживания и оттаивания; рекомендациях и инженерной методике определения процента армирования внецентренно сжатых железобетонных элементов, подвергающихся воздействию ЦЗО.

Методология и методы исследования.

В диссертационной работе использовались общенаучные методы познания: анализ и синтез, эксперимент и абстрагирование, а также вероятностно-статистический метод.

Положения, выносимые на защиту:

1. Результаты экспериментальных исследований полных диаграмм бетона при центральном сжатии и влияние на них ЦЗО.

2. Алгоритм расчёта внецентренно сжатых железобетонных элементов учитывающий изменчивость прочностных и деформационных характеристик материалов.

3. Оценка влияния статистической изменчивости и взаимной корреляции прочностных и деформативных свойств бетона на несущую способность внецентренно сжатых железобетонных элементов с симметричным армированием с учётом ЦЗО.

4. Корректировка расчётного значения предельных деформаций бетона ε_{b0} повышающая обеспеченность результатов расчётов несущей способности при внецентренном сжатии.

5. Инженерная методика определения процента армирования внецентренно сжатых железобетонных элементов с учётом ЦЗО.

Степень достоверности результатов проведенных исследований обоснована применением общепринятых подходов и методов математической статистики, теории надёжности, гипотез и допущений современной теории железобетона; подтверждена публикациями в рецензируемых изданиях, рекомендованных ВАК, и индексируемых в международной базе научного цитирования Scopus; обеспечена использованием стандартных методов испытаний, осуществлявшихся поверенным оборудованием.

Апробация результатов исследования.

Результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на международных конференциях:

1. International Conference on Materials Physics, Building Structures and Technologies in Construction, Industrial and Production Engineering (MPCPE-2022), г. Владимир 26–28 апреля 2022 г.

2. Международной научно-практической конференции «Строительные конструкции, здания и сооружения. От науки до инновации», г. Санкт-Петербург, 10–11 июня 2021 г.

3. International Conference on Geotechnics Fundamentals and Applications in Construction: New Materials, Structures, Technologies and Calculations, GFAC 2019, г. Санкт-Петербург 06–08 февраля 2019 г.

4. Международной научно-практической конференции, посвященной 150-летию со дня рождения профессора А.Ф. Лолейта, г. Москва, 30 ноября 2018 г.

5. Международной научной конференции молодых учёных «Актуальные вопросы развития науки и технологий», пос. Караваево, Костромская область, 04 апреля 2019 г.

6. Международной научно-практической конференции «International Scientific Siberian Transport Forum–TransSiberia 2019», г. Новосибирск, 22– 27 мая 2019 г.

7. VII Международном симпозиуме «Актуальные проблемы компьютерного моделирования конструкций и сооружений (APCSCE 2018)», г. Новосибирск, 1–8 июля 2018 г.

Публикации. Материалы диссертации опубликованы в 17 печатных работах, в том числе 9 работ опубликованы в изданиях, входящих в перечень ведущих рецензируемых научных журналов, утверждённый ВАК РФ, 3 работы индексируются в международной базе Scopus.

Внедрение результатов работы. Внедрение результатов исследований подтверждаются: актом о внедрении ООО «БетоноРастворный завод» г. Кострома; актом о внедрении АС ПКБ «Костромская ГСХА», пос. Караваево Костромского района Костромской области; актом об использовании в учебном процессе ФГБОУ ВО «Костромская государственная сельскохозяйственная академия», пос. Караваево Костромского района Костромской области.

Структура и объём работы. Диссертация состоит из введения, трёх глав, заключения, списка литературы из 156 источников из них 38 зарубежные. Представлена на 149 страницах печатного текста, содержит 48 рисунков, 18 таблиц, 50 формул и 2 приложения. Работа выполнена при Федеральном государственном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет» (ФГБОУ ВО СПбГАСУ).

Во введении сформулирована тема исследования, показана её актуальность, определена научная гипотеза, приведено резюме диссертационной работы.

В первой главе «Общее состояние исследований по рассматриваемой теме» проведён анализ нормативной базы и имеющихся исследований по обеспечению надёжности строительных конструкций и элементов железобетонных конструкций. Выявлены вопросы, требующие решения. Сформулированы цель и задачи исследования.

Во второй главе «Экспериментальное исследование диаграмм σ – ε бетона при одноосном сжатии и влияния на их форму циклов замораживания и оттаивания» описаны методика и результаты проведённого эксперимента и их анализ. Определены закономерности статистического распределения прочностных и деформационных характеристик бетона с учётом ЦЗО. Исследовано влияние ЦЗО на энергию разрушения бетона, даны рекомендации по построению расчётных диаграмм бетона.

В третьей главе «Численное исследование влияния статистического распределения прочностных и деформационных характеристик бетона на обеспеченность результатов расчётов несущей способности внецентренно сжатых железобетонных элементов по нормальному сечению с учётом ЦЗО» разработан вероятностный алгоритм расчёта несущей способности железобетонного элемента по нормальному сечению. Исследовано влияние ЦЗО на статистическое распределение несущей способности и выполнена оценка обеспеченности результатов расчётов, проведённых по действующим нормам. Для увеличения обеспеченности результатов расчёта предложена корректировка расчётного значения предельных деформаций бетона ε_{b0}. Разработана методика определения процента продольного армирования при внецентренном сжатии с учётом ЦЗО.

В заключении изложены основные итоги, выводы и перспективы дальнейшей разработки темы исследования.

Основное содержание работы

1. Результаты экспериментальных исследований полных диаграмм бетона при центральном сжатии и влияние на их форму циклов замораживания и оттаивания. Задачей эксперимента являлась исследование диаграммы σ – ε бетона при центральном сжатии в пределах одного класса бетона по прочности на сжатие с учётом ЦЗО. Было изготовлено 46 образцов призм 100×100×400 мм класса по прочности на сжатие В20 (10 шт.) и В30 (36 шт.). Образцы В20 и 22 образца В30 не подвергались воздействию ЦЗО. 14 образцов из бетона В30 испытывались после ЦЗО. Методика замораживания и оттаивания основана на третьем ускоренном методе по ГОСТ 10060-2012. Цикл включает замораживание до –50°С, нагрев до –20°С и затем до +20°С. Количество ЦЗО – 6 принято исходя из снижения средней прочности в пределах 10…20%.

Испытания проводились на прессе ИП-1000-М-авто. Образцы нагружались при постоянной скорости перемещения плиты пресса, равной 0,005 м/с. Деформации измерялись осевым экстензометром EPSILON 3542RA. Загружение продолжалось до появления видимых не вооружённым взглядом трещин. Экспериментальная установка показана на рисунке 1, полученные диаграммы σ – ε на рисунке 2. В таблице 1 приведены полученные средние значения прочностных и деформационных характеристик бетона, коэффициенты их вариации и средние значения прочностных и деформационных характеристик в соответствии с СП 63.13330.2018. Полученные в результате эксперимента значения коэффициентов вариации предельных деформаций и начального модуля упругости сравнимы со значениями коэффициента вариации прочности.

Рисунок 1. Вид установки (вверху), образец в процессе испытаний (слева внизу) и после испытаний (справа внизу). Стрелками показаны образовавшиеся трещины

Таблица 1. Результаты испытаний.

	σ_{max}, МПа	ε_{b0}, ‰	E_b, ГПа
B20			
Среднее значение	21.5	1.85	22.95
Среднее значение по СП	19.33	2.00	27,5
К-т вариации	9.28%	11.16%	15.75%
B30			
Среднее значение	28.4	1.85	28.054
Среднее значение по СП	28.6	2.00	32.5
К-т вариации	10.82%	6.62%	4.82%
B30 после ЦЗО			
Среднее значение	24.6	1.720	23.55
К-т вариации	10.85%	7.73%	13.04%

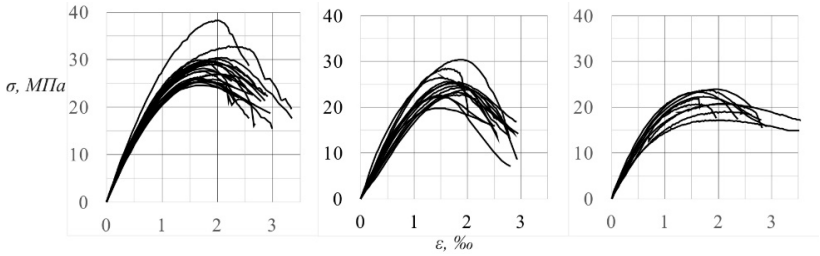


Рисунок 2. Диаграммы σ – ε бетона. Слева направо: B30, B30 после ЦЗО, B20

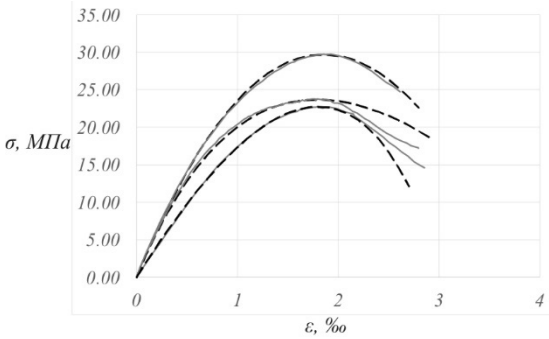


Рисунок 3. Экспериментальные диаграммы σ – ε бетона (сплошная линия) и аппроксимирующие их кривые по формуле (1) (пунктир)

На рисунке 3 приведены три экспериментальные диаграммы из каждой серии образцов (B20, B30 и ЦЗО) и построенные по характерным точкам этих диаграмм кривые по выражению (1). Восходящая ветвь экспериментальных диаграмм

практически совпадает с аналитической кривой. Диаграмма Н. И. Карпенко незначительно (на нисходящей ветви) отличается от зависимости ЕКБ-ФИП и также близка к экспериментальным диаграммам.

ЦЗО приводят к снижению максимальных напряжений, уменьшению начального модуля упругости и предельных деформаций (в среднем на 13,2%, 16,1% и 7% соответственно). Уменьшается энергия разрушения, характеризующаяся площадью, ограниченной диаграммой $\sigma - \varepsilon$ и горизонтальной осью координат, которую можно определить по формуле:

$$A = \int_0^{\varepsilon_{b2}} \sigma(\varepsilon)\, d\varepsilon \qquad (2)$$

где σ(ε) – функция, аппроксимирующая диаграмму $\sigma - \varepsilon$, в качестве которой используется выражение (1). Значение ε_{b2} определяется из условия снижения напряжений на нисходящей ветви диаграммы на 15% по сравнению с их максимальным значением. Размерность энергии разрушения: $\text{МПа} \cdot \frac{\text{м}}{\text{м}} = \frac{\text{МН} \cdot \text{м}}{\text{м}^2 \cdot \text{м}} = \frac{\text{МДж}}{\text{м}^3}$, а физический смысл – энергия разрушения единицы объёма бетона. Она показывает способность материала сопротивляться силовым и не силовым воздействиям, в том числе ЦЗО. Средние значения энергии разрушения, прочностных и деформационных характеристик бетона показаны в таблице 2.

Таблица 2. Средние значения энергии разрушения и соответствующие им средние значения характеристик бетона

Серия	Энергия разрушения, МДж/м^3	σ_{max}, МПа	ε_{b0}, ‰	E_b, ГПа
В20	46 425	21.5	1.853	22.95
В30	58 039	28.4	1.850	28.05
ЦЗО	42 809	24.6	1.720	23.55

Энергия разрушения более полно, чем прочность, характеризует потенциал работы материала в конструкции. При воздействии ЦЗО средняя прочность бетонных образцов класса по прочности на сжатие В30 уменьшилась с 28.4 МПа до 24.6 МПа, что больше, чем средняя прочность образцов класса по прочности на сжатие В20 (21.531 МПа). Энергия разрушения образцов после ЦЗО (42 809 МДж/м^3) из-за снижения значения предельных деформаций бетона оказалась меньше, чем соответствующая характеристика образцов серии В20. Следовательно, учёт действия ЦЗО при расчётах конструкций диаграммным методом только корректировкой расчётного сопротивления бетона не полностью отражает уменьшение энергетического потенциала материала. Исходя из результатов эксперимента для построения расчётных диаграмм бетона после ЦЗО при значении понижающего коэффициента прочности бетона от 0,85 и выше предлагается принимать равное ему значение понижающего коэффициента предельных деформаций бетона ε_{b0}.

При вероятностных расчётах представляет интерес взаимосвязь между прочностными и деформационными характеристиками бетона и энергией разрушения. Для её оценки были рассчитаны соответствующие коэффициенты линейной корреляции, которые показаны в таблицах 3 и 4.

Таблица 3. Взаимосвязь характеристик бетона

Серия образцов	Коэффициент линейной корреляции		
	$E_b - \varepsilon_{b0}$	$\sigma_{max} - E_b$	$\sigma_{max} - \varepsilon_{b0}$
B20	-0.303	0.898	-0.380
B30	-0.073	0.710	0.574
ЦЗО	-0.778	0.358	0.261

Таблица 4. Взаимосвязь энергии разрушения и характеристик бетона

Серия образцов	Коэффициент линейной корреляции		
	Энергия – ε_{b0}	Энергия – E_b	Энергия – σ_{max}
B20	0.762	0.364	0.276
B30	0.916	0.440	0.834
ЦЗО	0.546	0.082	0.912

Влияние максимальных напряжений и предельных деформаций ε_{b0} на величину энергии разрушения сравнимы, что подтверждает необходимость учёта воздействия ЦЗО на величину предельных деформаций при построении расчётных диаграмм бетона.

2. Алгоритм вероятностного расчёта несущей способности внецентренно сжатого железобетонного элемента на основе нелинейной деформационной модели. Расчёт основан на стандартных допущениях диаграммного метода, перечисленных в п. 8.1.20 СП 63.13330.2018. Алгоритм расчёта, реализован в среде Mathcad и состоит из четырех основных этапов:

1. Определение деформации растянутой (менее сжатой) грани ε_2 соответствующей статическому равновесию продольных сил и изгибающих моментов в нормальном сечении элемента при заданных эксцентриситете e_0 и деформации наиболее сжатой грани ε_1. Эта часть алгоритма реализована в виде процедуры (Процедура 1). Использованная при этом расчётная схема показана на рисунке 4.

В ходе процедуры относительно ε_2 решается система уравнений:

$$\begin{aligned} N &= N_b\left(\varepsilon_1, \varepsilon_2\right) + \sum_{i=1}^{n} N_{Si}\left(\varepsilon_1, \varepsilon_2\right) \\ N \cdot e_0 &= N_b\left(\varepsilon_1, \varepsilon_2\right) \cdot z_b + \sum_{i=1}^{n} N_{Si}\left(\varepsilon_1, \varepsilon_2\right) \cdot z_{Si} \end{aligned} \tag{3}$$

где N – внешняя продольная сила;

$N_b(\varepsilon_1,\varepsilon_2)=\int_0^h b\cdot\sigma_b\left(\varepsilon\left(x,\varepsilon_1,\varepsilon_2\right)\right)dx$ – усилие в бетоне; $\sigma_b(\varepsilon)$ – аналитическая функция, описывающая зависимость σ – ε бетона;

$\varepsilon\left(x,\varepsilon_1,\varepsilon_2\right)=\varepsilon_1+\left(\varepsilon_2-\varepsilon_1\right)\cdot\frac{x}{h}$ – зависимость деформации от координаты *x* в соответствии с гипотезой плоских сечений;

$N_{Si}\left(\varepsilon_1,\varepsilon_2\right)=A_{Si}\cdot\sigma_{Si}\left(\varepsilon\left(x_{ai},\varepsilon_1,\varepsilon_2\right)\right)$ – усилия в арматуре; $\sigma_{Si}(\varepsilon)$ – аналитическая функция, описывающая зависимость σ – ε арматуры;

e_0, z_{Si} – эксцентриситеты продольной силы и расстояния от линии действия соответствующих сил до оси элемента;

$z_b=\frac{h}{2}-\frac{\int_0^h x\cdot\sigma_b\left(\varepsilon\left(x,\varepsilon_1,\varepsilon_2\right)\right)dx}{\int_0^h\sigma_b\left(\varepsilon\left(x,\varepsilon_1,\varepsilon_2\right)\right)dx}$ – плечо усилия в бетоне относительно оси элемента.

Вид аналитических зависимостей σ – ε бетона и арматуры, количество арматурных стержней и форма поперечного сечения могут быть произвольными. Для учёта сложной формы сечения постоянная *b* заменяется функцией ширины сечения от координаты *b*(*x*).

2. Определение максимальной продольной силы при заданных значениях эксцентриситета и прочностных и деформационных характеристик бетона и арматуры осуществляется с использованием Процедуры 1 с варьированием деформации ε_1 для поиска максимума продольной силы. Эта часть алгоритма так же оформлена в виде процедуры (Процедура 2). В общем виде Процедуру 2 можно записать:

$$N_{\max}=f\left(R_b,E_b,\varepsilon_{b0},\varepsilon_{b2},R_{S1},E_{S1}...R_{Sn},E_{Sn}\right) \quad (4)$$

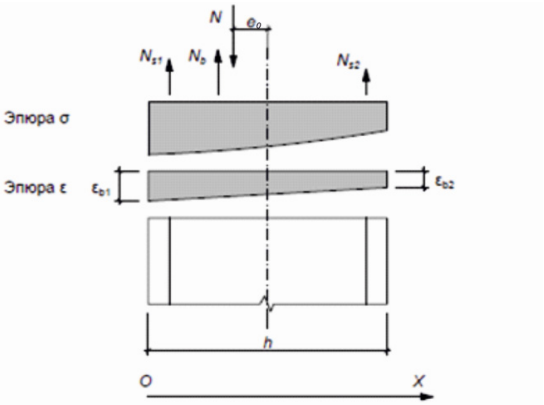


Рисунок 4. Расчётная схема для определения несущей способности

3. В соответствии с принятым законом распределения формируются векторы псевдослучайных чисел с количеством элементов *N,* имитирующие проч-

ностные и деформационные характеристики материалов. Для каждого набора данных выполняется Процедура 2 и формируется вектор псевдослучайных значений несущей способности при заданном эксцентриситете. Укрупнённая схема вероятностного расчёта показана на рисунке 5. Пример результата в виде гистограммы значений несущей способности и соответствующей кривой нормального распределения представлен на рисунке 6.

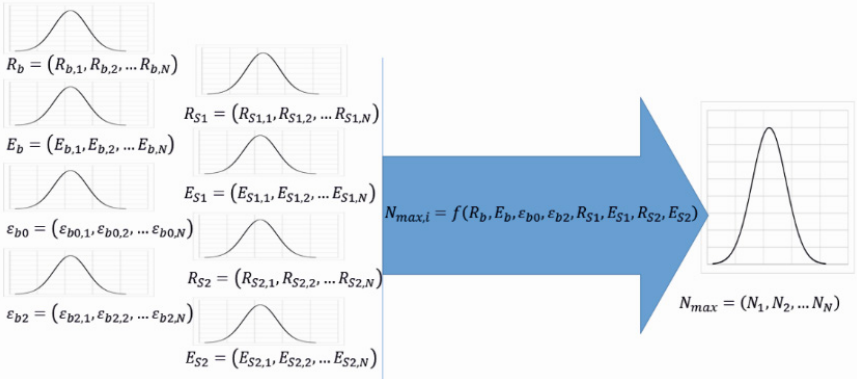


Рисунок 5. Укрупнённая схема вероятностного расчёта несущей способности

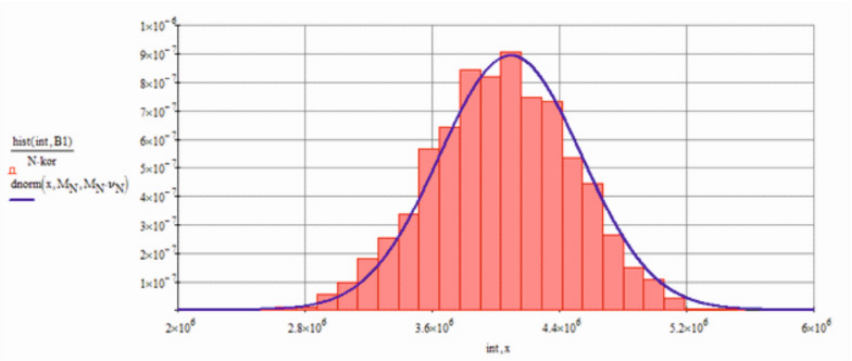


Рисунок 6. Гистограмма вектора значений продольной силы и теоретическая кривая нормального распределения

Последний этап алгоритма учитывает гибкость внецентренно сжатого стержня и основан на пунктах 8.1.14…15 СП 63.13330.2018 в соответствии с которыми:

$$N_{нс} \cdot e_0 = N \cdot e_0 \cdot \eta(N) \qquad (5)$$

В выражении (5) $N_{нс}$ – несущая способность по нормальному сечению (один из элементов вектора, полученного в результате Процедуры 3), e_0 – эксцентриситет продольной силы относительно продольной оси элемента, N – несущая способность с учётом гибкости, η – коэффициент продольного изгиба, определяемый по выражению (8.14) СП.

С учётом фиксированного значения e_0:

$$N = N_{нс} \Big/ \eta(N) = N_{нс} \Big/ \left(1 \Big/ \left(1 - N / N_{кр}\right)\right) \quad (6)$$

Решив данное уравнение относительно N получим:

$$N = N_{кр} \cdot N_{нс} \Big/ \left(N_{кр} + N_{нс}\right) \quad (7)$$

где $N_{кр}$ – критическая сила, определяемая по п. 8.1.14…8.1.15 СП 63.13330.2018. Используя выражение (7) для каждого элемента вектора несущей способности, получаем распределение несущей способности с учётом гибкости.

3. Оценка влияния статистической изменчивости и взаимной корреляцию прочностных и деформативных свойств бетона на несущую способность внецентренно сжатых железобетонных элементов с симметричным армированием с учётом ЦЗО. Исходные псевдослучайные распределения прочностных и деформационных характеристик бетона и арматуры приняты по результатам эксперимента и нормативным документам. Общее число реализаций случайной величины в каждой последовательности равно 5 000. Рассматривалась колонна с симметричным армированием сечением 400×400 мм и 800×400 мм. Бетон В30, арматура А500. Расстояние от центра тяжести сжатой и растянутой (менее сжатой) арматуры до ближайшей грани колонны приняты равными 50 мм. Расчёты проведены в диапазоне относительного эксцентриситета продольной силы (e_0/h_0) 0,03…4,00 до и после ЦЗО. Величина процента армирования составляла 0,25%, 0,50%, 1,00% 2,00% и 3,00%. Для каждого распределения по среднему значению и коэффициенту вариации определено расчётное значение несущей способности. Результаты расчётов при μ = 0,25% и μ = 3,00% показаны на рисунках 7…9.

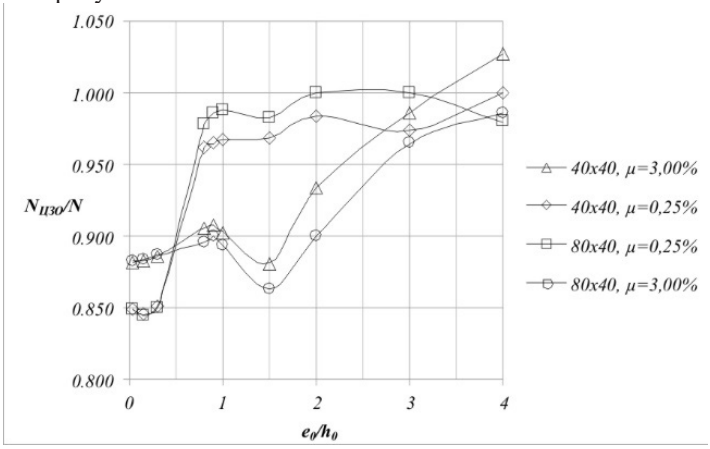


Рисунок 7. Изменение расчётной несущей способности при воздействии ЦЗО в зависимости от относительного эксцентриситета и процента продольного армирования без учёта гибкости

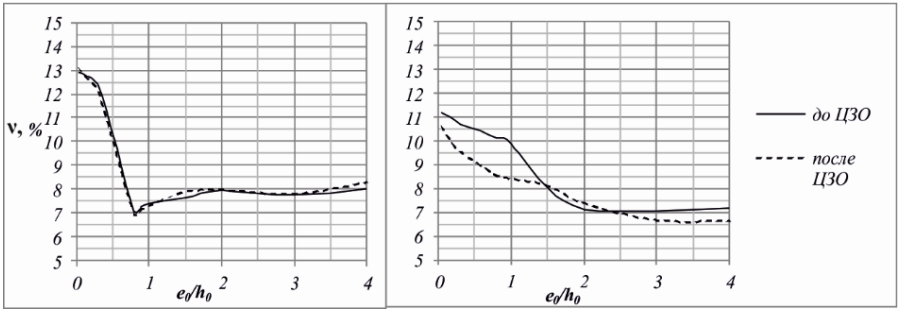


Рисунок 8. Зависимость коэффициента вариации несущей способности от относительного эксцентриситета, сечение 40×40 см, μ = 0,25% (слева) и μ = 3,00% (справа)

При μ = 3,00% увеличивается верхняя граница зоны эксцентриситетов, соответствующих снижению несущей способности в результате ЦЗО, а влияние эксцентриситета уменьшается. Характер действия ЦЗО на расчётную несущую способность при увеличении процента армирования не меняется. На графиках (рис. 8) прослеживаются две зоны: при малых эксцентриситетах значение коэффициента вариации несущей способности максимально, а с ростом эксцентриситета и увеличением напряжений в растянутой арматуре оно снижается.

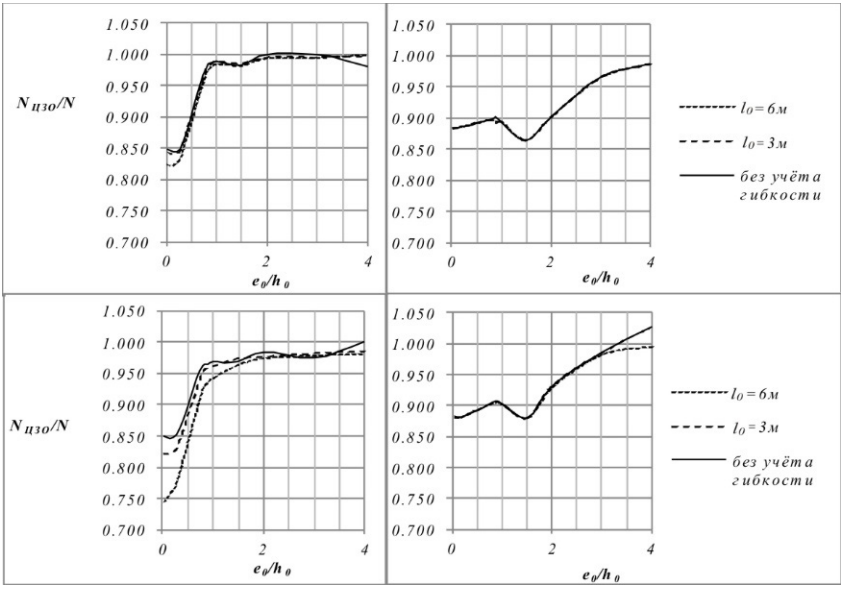


Рисунок 9. Изменение расчётной несущей способности в результате ЦЗО в зависимости от относительного эксцентриситета с учётом гибкости. Вверху сечение 80×40 см при μ = 0,25% (слева) и μ = 3,00% (справа). Внизу сечение 40×40 см при μ = 0,25% (слева) и μ = 3,00% (справа)

Рост процента армирования приводит к снижению максимального значения коэффициента вариации и расширению зоны эксцентриситета с его повышенным значением. Общий вид зависимости при этом сохраняется. Влияние гибкости при воздействии ЦЗО (рис. 9) наиболее заметно при малом проценте армирования для колонны 40×40 см. Снижение несущей способности составляет 17% и 26% при l_0 = 3 м и l_0 = 6 м соответственно. За счёт снижения жёсткости, вызванного уменьшением модуля упругости бетона при ЦЗО, несущая способность уменьшилась на 2% и 11%. Для колонны 80×40 см при μ = 0,25% и l_0 = 6м снижение несущей способности за счёт гибкости не существенно (2…3%). Увеличение армирования приводит к снижению влияния модуля упругости бетона на общую жёсткость сечения.

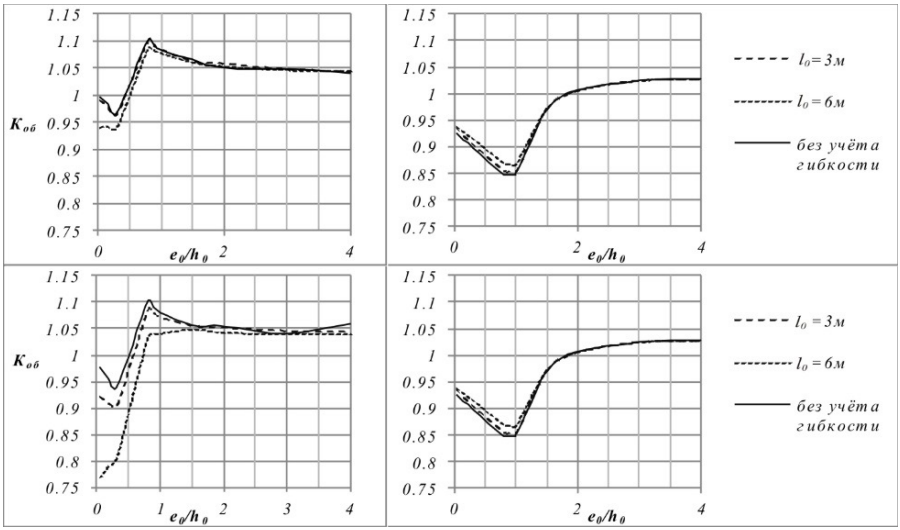


Рисунок 10. Зависимость коэффициента обеспеченности от относительного эксцентриситета, сечение 40×40 см. Вверху до ЦЗО μ = 0,25%, (слева), μ = 3,00%, (справа). Внизу после ЦЗО μ = 0,25%, (слева) и μ = 3,00% (справа).

Практический интерес представляет оценка обеспеченности результатов детерминированных расчётов, проведённых в соответствии с действующими нормативными документами. Для этого определяется коэффициент обеспеченности, равный отношению несущей способности с заданной обеспеченностью 99,86%, рассчитанной вероятностным методом, к несущей способности определённой детерминированным расчётом. При детерминированном расчёте значения прочностных и деформационных характеристик принимаются по СП 63.13330.2018, а ЦЗО учитывается уменьшением расчётного сопротивления бетона. Результаты расчёта коэффициента обеспеченности для μ = 0.25% и μ = 3.00% приведены на рисунках 10 и 11.

При малых эксцентриситетах для всех рассмотренных вариантов значение коэффициента обеспеченности меньше единицы. До ЦЗО при μ = 0.25% и l_0 = 3 м разница не превышает 4%. С увеличением процента армирования обеспеченность несущей способности снижается в большей степени и при μ = 3,00% достигает 12%. С увеличением эксцентриситета значение коэффициента обеспеченности приближается к единице. Зависимости обеспеченности несущей способности после ЦЗО аналогичны, отличаются большим снижением при малых эксцентриситетах и больших процентах армирования (до 15% для μ = 3,00%). При достаточной жёсткости сечения гибкость в рассмотренном диапазоне расчётных длин практически не влияет на обеспеченность несущей способности. В случае малой жёсткости (рисунок 10) обеспеченность результатов расчёта при l_0 = 6 м и μ = 0,25% снизилась на 23%. Снижение несущей способности при ЦЗО максимально при малых эксцентриситетах, что вызвано снижением прочности и предельных деформаций бетона. С ростом гибкости проявляется влияние снижения модуля упругости бетона.

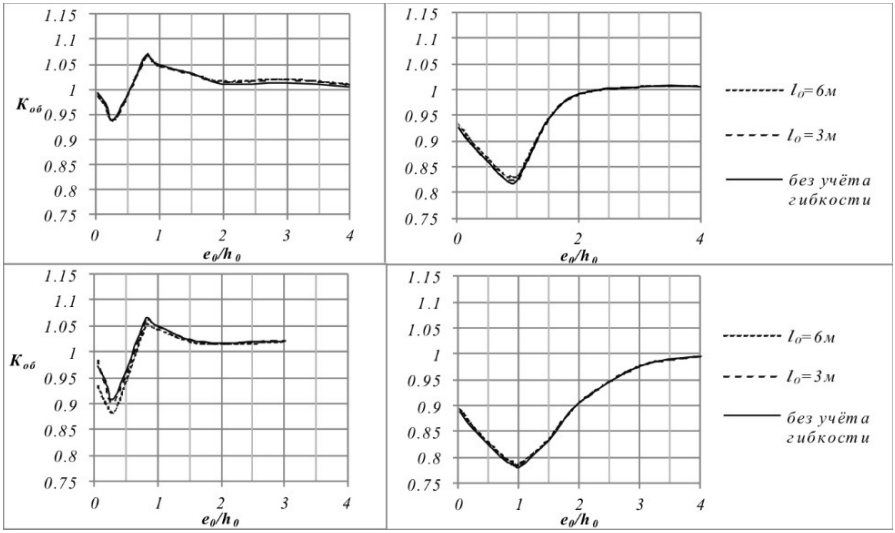


Рисунок 11. Зависимость коэффициента обеспеченности от относительного эксцентриситета, сечение 80×40 см. Вверху до ЦЗО μ = 0,25%, (слева), μ = 3,00%, (справа). Внизу после ЦЗО μ = 0,25%, (слева) и μ = 3,00% (справа).

4. Предложения по учёту изменчивости предельных деформаций бетона при расчёте несущей способности внецентренно сжатых железобетонных элементов. Для оценки влияния значения ε_{b0} на результаты расчёта несущей способности использована описанная ранее методика (Процедура 1 и Процедура 2). Расчётные значения прочностных и деформационных характеристик бетона (R_b и E_b) приняты в соответствии с нормами, а значение ε_{b0} изменялось исходя из его

коэффициента вариации (Таблица 1) в диапазоне (0,7…0,95) ε_{b0n}, где ε_{b0n} = 2‰. ЦЗО учитывается дополнительным снижением среднего значения ε_{b0}. На рисунке 12 показано отношение результатов расчёта несущей способности со скорректированным значением и нормативном значении ε_{b0} (N/N_n) в зависимости от эксцентриситета продольной силы при $\varepsilon_{b0}/\varepsilon_{b0n}$ = 0,7 и $\varepsilon_{b0}/\varepsilon_{b0n}$ = 0,85 при различных процентах армирования μ. Влияние значения ε_{b0} на результаты расчёта несущей способности для рассмотренных поперечных сечений зависит от эксцентриситета продольной силы и процента армирования (не существенно для малых процентов армирования и близко к 15% при μ = 3,00% и $\varepsilon_{b0}/\varepsilon_{b0n}$ = 0,7).

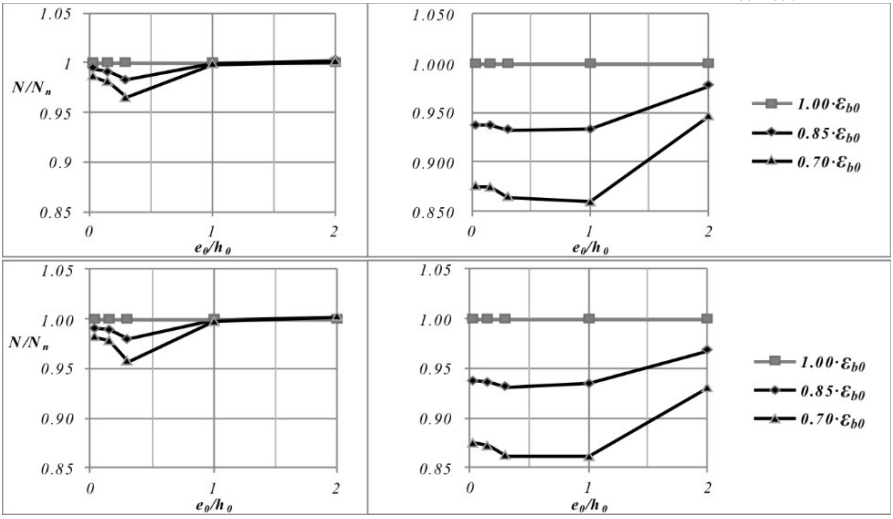


Рисунок 12. Зависимость результата расчёта несущей способности от относительного эксцентриситета при μ = 0,25% (слева) и μ = 3,00% (справа). Сечение 40×40 см (вверху), 80×40 см (внизу).

Зависимости на рис. 11 и 12 схожи, а результаты детерминированных расчётов при $\varepsilon_{b0}/\varepsilon_{b0n}$ = 0,7 близки к результатам вероятностных расчётов с обеспеченностью 99,86%. В таблице 5 показаны диапазоны и размах значений коэффициента обеспеченности расчётов с использованием нормативного и скорректированного значения ε_{b0}. При нормативном значении ε_{b0} = 2‰ минимальное значение коэффициента обеспеченности находится в диапазоне 0,781…0,967, а при ε_{b0} = 0,7 · 2‰ = 1,4‰ увеличивается до 0,954…1,009.

Таблица 5. Диапазоны коэффициента обеспеченности несущей способности

№ пп	Поперечное сечение, процент армирования	$K_{об}$, нормативное значение ε_{b0}	$K_{об}$, скорректированное значение ε_{b0}
1	40x40, μ = 0,25%, до ЦЗО	0,967…1,092 (0,125)	1,000…1,104 (0,104)

Окончание табл. 5

№ пп	Поперечное сечение, процент армирования	$K_{об}$, нормативное значение ε_{b0}	$K_{об}$, скорректированное значение ε_{b0}
2	40х40, μ = 3,00%, до ЦЗО	0,848…1,026 (0,178)	0,987…1,062 (0,075)
3	80х40, μ = 0,25%, до ЦЗО	0,943…1,068 (0,125)	0,984…1,075 (0,091)
4	80х40, μ = 3,00%, до ЦЗО	0,817…1,006 (0,189)	0,954…1,065 (0,111)
5	40х40, μ = 0,25%, после ЦЗО	0,939…1,102 (0,163)	0,982…1,104 (0,122)
6	40х40, μ = 3,00%, после ЦЗО	0,821…1,059 (0,238)	1,009…1,093 (0,084)
7	80х40, μ = 0,25%, после ЦЗО	0,911…1,066 (0,155)	0,964…1,079 (0,115)
8	80х40, μ = 3,00%, после ЦЗО	0,781…1,063 (0,282)	0,959…1,069 (0,11)

5. Инженерная методика определения процента армирования внецентренно сжатых железобетонных элементов при воздействии ЦЗО. За счёт снижения модуля упругости бетона при ЦЗО уменьшается жёсткость сечения и несущая способность элементов большой гибкости и малых процентов армирования (рис. 9 и 10). Рассматривая значение коэффициента продольной жёсткости, как функцию продольной силы N, модуля упругости бетона E_b, процента армирования μ и расчётной длины l_0:

$$\eta\left(N, E_b, \mu, l_0\right) = \frac{1}{1 - \dfrac{N}{N_{кр}\left(E_b, \mu, l_0\right)}} \tag{8}$$

получаем выражение изменения коэффициента продольной жёсткости:

$$\begin{aligned}\Delta\eta\left(N, E_b, E_{b,\text{ЦЗО}}, \mu, l_0\right) = \Delta\eta\left(N, E_{b,\text{ЦЗО}}, \mu, l_0\right) - \\ - \Delta\eta\left(N, E_b, \mu, l_0\right) = \Delta\eta_{гр}\end{aligned} \tag{9}$$

E_b и $E_{b,\text{ЦЗО}}$ значения модуля упругости бетона до и после ЦЗО.

Решив уравнение (9) при заданных значениях N, E_b, $E_{b,\text{ЦЗО}}$, μ и $\Delta\eta_{\text{гр}}$ относительно l_0 получим её значение, при котором снижение жёсткости сечения будет равно $\Delta\eta_{\text{гр}}$. Уравнение (9) решено численно при $\Delta\eta_{\text{гр}} = 0{,}05$ и $E_{b,\text{ЦЗО}} = 0{,}8E_b$ при варьировании значений μ и N. Далее была подобрана функция (10), соответствующая результатам решения уравнения (9):

$$\begin{aligned}\mu &= k \cdot l_0 / h - 4{,}48;\ \text{где} \\ k &= 0{,}36 \cdot N / N_{\max} + 0{,}25; \\ N_{\max} &= R_b \cdot b \cdot h + R_{SC} \cdot \mu \cdot b \cdot h_0\end{aligned} \tag{10}$$

На рисунке 13 в координатах l_0/h и μ показаны результаты решения уравнения (9) и соответствующие графики по выражению (10) для $N/N_{\max}$ равного 0,5, 0,8 и 1,0.

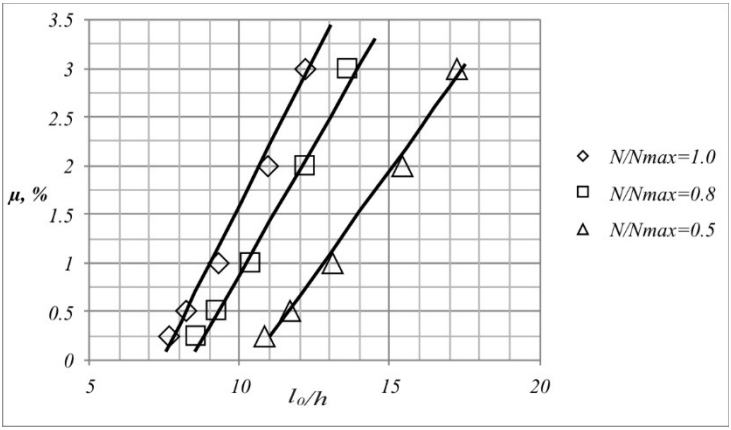


Рисунок 13. Решение уравнения (9) – точки, и соответствующие им прямые по выражению (10)

Таким образом, разработанная методика выглядит следующим образом:

1. По заданным геометрическим характеристикам и результатам статического расчёта определяются относительная продольная сила N/N_{max} и гибкость l_0/h;

2. По формуле (10) вычисляется значение процента армирования μ;

3. При $\mu \le \mu_{мин}$, где $\mu_{мин}$ – минимальный процент армирования по СП, принимается $\mu = \mu_{мин}$.

В случае конструктивной сложности реализации полученных процентов армирования ($\mu > 3{,}0 \ldots 4{,}0\%$) корректируется геометрия элемента.

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

1. Изменчивость прочностных и деформационных характеристик бетона сопоставима, а их значения взаимозависимы, что необходимо учитывать при расчётах несущей способности.

2. ЦЗО приводят к трансформации диаграммы σ – ε бетона, уменьшаются значения прочностных и деформационных характеристик бетона и снижается его энергии разрушения. Для учёта воздействия ЦЗО при расчётах конструкций предложено совместное использование понижающих коэффициентов к значениям расчётного сопротивления бетона и предельных деформаций ε_{b0}.

3. На основе диаграммного метода разработан вероятностный алгоритм, позволяющий оценить статистические характеристики несущей способности внецентренно сжатого железобетонного элемента по нормальному сечению.

4. Коэффициент вариации несущей способности по нормальному сечению зависит от эксцентриситета продольной силы: максимален при малых эксцентриситетах и снижается с их ростом. Диапазон изменения значения коэффициента вариации при $\mu = 0{,}25\%$ составляет 7…13%, а при $\mu = 3{,}00\%$ – 7…11%. Это приводит к снижению расчётной несущей способности в результате ЦЗО

при малых эксцентриситетах (до 15…25% при большой гибкости и малом проценте армирования).

5. Обеспеченность результатов расчёта несущей способности по действующим нормам зависит от эксцентриситета продольной силы, процента армирования и гибкости. При малых эксцентриситетах обеспеченность результатов расчёта ниже обеспеченности расчётного сопротивления бетона (до 21% при μ = 3,00% и до 9% при μ = 0,25%). ЦЗО приводят к снижению обеспеченности несущей способности при малых эксцентриситетах и большой гибкости (до 15…18%), а при больших эксцентриситетах практически не оказывает на неё влияния.

6. Уменьшение расчётного значения ε_{b0} с 2,0‰ до 1,4‰ увеличивает обеспеченность результатов расчёта несущей способности с 0,781…0,967 до 0,954…1,009.

7. Разработана инженерная методика определения процента продольного армирования внецентренно сжатых железобетонных элементов, подвергающихся ЦЗО.

Дальнейшие исследования целесообразно направить на накопление данных об изменчивости деформационных характеристик бетона с учётом воздействия различных факторов окружающей среды, усовершенствование методик расчётов в вероятностной постановке и уточнение расчётных характеристик материалов для детерминированных расчётов.

ОСНОВНЫЕ НАУЧНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Научные статьи, опубликованные в ведущих рецензируемых научных изданиях из перечня, размещенного на официальном сайте Высшей аттестационной комиссии:

1. Попов В.М., **Плюснин М.Г.** Оценка несущей способности железобетонных конструкций в естественных условиях холодного климата // Вестник гражданских инженеров. 2014. № 2 (43). С. 42–47. (0,25 п. л.)

2. Попов В.М., **Плюснин М.Г**. Влияние изменчивости характеристик бетона и арматуры на несущую способность изгибаемых железобетонных элементов // Вестник гражданских инженеров. 2015. № 3 (50). С. 80–84. (0,25 п. л.)

3. Попов В.М., **Плюснин М.Г.** Влияние деформационных характеристик бетона на несущую способность изгибаемых железобетонных элементов // Промышленное и гражданское строительство. 2015. № 8. С. 5–10. (0,31 п. л.)

4. **Плюснин М.Г**., Морозов В.И., Попов В.М., Савин С.Н., Смирнова Е.Э. Оценка влияния эксцентриситета продольной силы на обеспеченность несущей способности сжатых железобетонных элементов // Промышленное и гражданское строительство. 2019. № 6. С. 29–34(0,31 п. л.)

5. **Плюснин М.Г.**, Цыбакин С.В. Экспериментальное исследование изменчивости деформационных характеристик бетона при сжатии // Вестник МГСУ. 2020. Т. 15. № 10. С. 1390–1398. (0,56 п. л.)

6. Попов В.М., **Плюснин М.Г**. Экспериментальное исследование диаграмм σ – ε бетона при одноосном сжатии и влияния на их форму ЦЗО // Вестник гражданских инженеров. 2020. № 4 (81). С. 80–88. (0,56 п. л.).

7. **Плюснин М.Г**. Оценка обеспеченности результатов расчетов несущей способности по нормальному сечению внецентренно сжатых железобетонных элементов с использованием нелинейной деформационной модели при действии ЦЗО // Вестник гражданских инженеров. 2021. № 2 (85). С. 57–67. (0,63 п. л.).

8. Попов В. М., Пухаренко Ю. В., **Плюснин М. Г**., Белов В. В. Оценка влияния значения предельных деформаций бетона при сжатии на обеспеченность результатов расчета прочности внецентренно сжатого железобетонного элемента по нормальному сечению с использованием нелинейной деформационной модели // Вестник гражданских инженеров. 2021. № 6 (89). С. 42–50. (0,56 п. л.).

9. **Плюснин М.Г**. Влияние циклов замораживания и оттаивания на несущую способность внецентренно сжатых элементов железобетонных конструкций // Вестник гражданских инженеров. 2022. № 2 (91). С. 30–35. (0,63 п. л.).

Публикации в изданиях, входящих в международные базы цитирования Scopus и Web of Science:

10. Popov V., **Plyusnin M**., Morozov V., Pukharenko Y. Consideration of variability of concrete characteristics in calculation of reinforced concrete structures // Materials Science Forum. 2016. Т. 871. P. 166. (0,38 п. л.).

11. Plyusnin M.G., Morozov V.I., Popov V.M. Operating peculiarities of reinforced concrete structures in intense cold and freeze-thaw temperature // Geotechnics Fundamentals and Applications in Construction: New Materials, Structures, Technologies and Calculations. Proceedings of the International Conference on Geotechnics Fundamentals and Applications in Construction: New Materials, Structures, Technologies and Calculations, GFAC 2019. 2019. P. 254–258. (0,25 п. л.).

12. Morozov V., Popov V., Kondrateva L., **Plyusnin M.** Bending and eccentrically compressed reinforced concrete structures at low and freeze-thaw temperatures // Advances in Intelligent Systems and Computing. 2020. Т. 1116 AISC. P. 329–338. (0,56 п. л.).

Публикации в других изданиях:

13. **Плюснин М.Г.**, Бахчев В.В., Поддубная Е.В., Смирнов А.В. Оценка изменчивости формы полной диаграммы σ - ε бетона при сжатии // Актуальные вопросы развития науки и технологий. Сборник статей международной научной конференции молодых учёных. 2019. С. 206–210. (0,25 п. л.).

14. **Плюснин М.Г.**, Бахчев В.В., Поддубная Е.В., Смирнов А.В. Вероятностный расчёт внецентренно сжатого железобетонного элемента на прочность по нормальному сечению // Актуальные проблемы науки в агропромышленном комплексе. Сборник статей 70-й международной научно-практической конференции. Под редакцией С.В. Цыбакина, С.А. Полозова, А.В. Рожнова. 2019. С. 36–39. (0,25 п. л.).

15. **Плюснин М.Г.**, Романов М.А., Гозиев Ш. Оценка влияния ЦЗО на несущую способность внецентренно сжатых железобетонных элементов // Актуальные вопросы развития науки и технологий. сборник статей международной научно-практической конференции молодых учёных. 2018. С. 216–220. (0,25 п. л.)

16. Морозов В.И., Попов В.М., **Плюснин М.Г**. Влияние армирования изгибаемых железобетонных элементов на их долговечность в условиях переменного замораживa-

ния и оттаивания // Сборник докладов Международной научно-практической конференции, посвященной 150-летию со дня рождения профессора А.Ф. Лолейта. Под редакцией А.Г. Тамразяна. 2018. С. 285–289. (0,31 п. л.)

17. **Плюснин М.Г.**, Романов М.А., Гозиев Ш. Нелинейная деформационная модель при расчёте прочности внецентренно сжатых железобетонных элементов // Актуальные вопросы развития науки и технологий. Сборник статей 69-й международной научно-практической конференции: Под ред. С.В. Цыбакина, С.А. Полозова, А.В. Рожнова. 2018. С. 50–54. (0,25 п. л.).

Компьютерная верстка *В. С. Весниной*

Подписано к печати 18.11.2022. Формат 60×84 $^{1}/_{16}$. Бум. офсетная.
Усл. печ. л. 1,3. Тираж 120 экз. Заказ 136.
Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет.
190005, Санкт-Петербург, 2-я Красноармейская ул., д. 4.
Отпечатано на МФУ. 198095, Санкт-Петербург, ул. Розенштейна, д. 32, лит. А.