

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
«Тольяттинский государственный университет»

Архитектурно-строительный институт
(наименование института полностью)

Центр архитектурных, конструктивных решений и организации строительства
(наименование)

08.04.01 Строительство

(код и наименование направления подготовки)

Строительство, эксплуатация и реконструкция зданий и сооружений

(направленность (профиль))

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА (МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ)

на тему Облегченная конструкция железобетонной колонны

Обучающийся

Д.Г. Жданов

(Инициалы Фамилия)

(личная подпись)

Научный

руководитель

канд. техн. наук, доцент, Д.С. Тошин

(ученая степень (при наличии), ученое звание (при наличии), Инициалы Фамилия)

Тольятти 2024

Оглавление

Введение.....	4
Глава 1 Анализ основных типовых железобетонных колонн	9
1.1 Общие сведения о железобетонных колоннах	9
1.1.1 Основные формы сечений железобетонных колонн	9
1.1.2 Сборные железобетонные колонны	11
1.1.3 Монолитные железобетонные колонны.....	12
1.2 Преимущества и недостатки сборных и монолитных колонн.....	13
1.2.1 Преимущества и недостатки сборных колонн	14
1.2.2 Преимущества и недостатки монолитных колонн.....	15
1.3 Требования, предъявляемые к железобетонным колоннам	16
Глава 2 Подготовка к испытаниям	20
2.1 Основные виды испытаний	20
2.2 Подходящий под условия и техническую базу вид испытания.....	23
2.3 Установка для проведения испытаний	24
2.4 Описание образцов и требования к ним.....	25
2.5 Методика проведения испытаний.....	26
2.6 Техника безопасности при проведении испытаний.....	26
2.6.1 Техника безопасности пред началом выполнения работ	27
2.6.2 Техника безопасности во время работы.....	27
Глава 3 Программа экспериментальных исследований модели железобетонной колонны	29
3.1 Цель и задачи экспериментального исследования модели железобетонной колонны.....	30
3.2 Модели экспериментальных образцов	31
3.3 Экспериментальная установка и приборы	33
3.4 Теоретическая информация по проведению испытания модели железобетонной колонны.....	36
Глава 4 Подготовка моделей колонн к проведению испытаний.....	44

4.1	Изготовление образцов для испытания	44
4.2	Изготовление опалубки.....	45
4.3	Изготовление арматурного каркаса	49
4.4	Изготовление моделей железобетонных колонн для испытаний.....	56
4.4.1	Изготовление бетонной смеси	57
4.5	Подготовка испытываемых образцов и определение основных характеристик к проведению испытаний	59
4.5.1	Определение фактической прочности бетона.....	64
4.5.2	Подготовка модели колонны к эксперименту.....	66
Глава 5	Проведение экспериментов и обработка результатов	68
5.1	Проведение экспериментальных испытаний.....	68
5.2	Анализ результатов испытаний.....	88
5.2.1	Теоретический расчет по предельным усилиям.....	88
5.2.2	Теоретический расчет по деформационной модели	91
5.2.3	Сравнение полученных результатов испытания моделей колонн и значений теоретических расчетов	92
Заключение	110
Список используемой литературы и используемых источников.....		111

Введение

Актуальность работы. Современная строительная отрасль имеет огромный вектор развития монолитного строительства, так как данные технологии позволяют проектировать и возводить здания нестандартной формой, с разнообразной планировкой и эстетическим видом. Но большинство проектных организаций придерживаются тенденции упрощения и минимизации трудозатрат при проектировании, когда достижения требуемой несущей способности без учета материалоемкости и трудозатрат является заключительным этапом в их работе.

Рациональное использование строительных материалов позволит повысить эффективность применения этих ресурсов и добиться качественных показателей прочности монолитных железобетонных конструкций при тех же сечениях с уменьшением удельного веса отдельных элементов и в последствии всего здания в целом.

Уменьшение материалоемкости производства монолитных работ без ущерба качества и надежности конструкций здания – актуальный вопрос, которому посвящена данная магистерская диссертация.

Степень разработанности темы. Данная тема мало изучена так как слабая финансовая поддержка новаторов с устаревшими консервативными взглядами в проектной сфере не дают протолкнуться на свет новым неординарным решениям, также интересы заказчиков и проектировщиков в большинстве случаев расходятся, так как у первых важным является экономия бюджета, а вторые сталкиваются с экономическими рамками.

Объектом исследования магистерской диссертации является монолитный внецентренно сжатый железобетонный элемент с несъемными сферическими пустотообразователями.

Предметом исследования магистерской диссертации является несущая способность и жесткость монолитной железобетонной колонны с несъемными сферическими пустотообразователями из пенополистирола с разными эксцентриситетами.

Цель исследования заключается в экспериментально-теоретическом обосновании применения облегченных железобетонных внецентренно сжатых элементов с несъемными пустотообразователями.

Гипотеза исследования состоит в том, что при возведении монолитных железобетонных колонн в зданиях или сооружениях, возможно уменьшить собственный вес элемента, как вследствие вес всего здания в целом, без ущерба для надежности всего здания или сооружения с помощью введения в тело железобетонного внецентренно сжатого элемента сферических пустотообразователей.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- провести анализ научной и технической литературы и основных типов бетонных и железобетонных колонн;
- разработать методику и программу для проведения эксперимента;
- запроектировать экспериментальные модели колонн двух сечений, с пустотообразователями и сплошного;
- изготовить образцы запроектированных моделей колонн двух разных сечений;
- определить с помощью эксперимента несущую способность, относительные деформации образцов моделей монолитных железобетонных колонн с пустотообразователями и сплошного сечения при действии нагрузки с тремя разными эксцентриситетами;
- провести анализ и сравнение результаты испытаний моделей сплошного сечения и с пустотами;

- разработать рекомендации по применению облегченных железобетонных монолитных колонн со сферическими пустотообразователями.

Методы исследования:

- Теоретический: поиск, подбор и изучение необходимой литературы, связанной с темой диссертации, выполнение теоретических расчетов для определения предельной нагрузки, деформаций, момента образования трещин и характера разрушения элемента.
- Эмпирический: проведение экспериментов с фиксацией момента образования трещин, предельных значений нагрузки, характера разрушения и относительных деформаций в бетоне и арматуре на разных этапах нагружения.

Научная новизна исследования заключается в следующем:

- разработка нового типа монолитной колонны с сферическими пустотами из пенополистирола;
- получение в результате проведения экспериментальных исследований моделей железобетонных колонн при разных эксцентриситетах характеристик нового типа облегченной железобетонной монолитной колонны с несъемными пустотообразователями в теле элемента.

Практическая значимость исследования состоит в экспериментальном доказательстве эффективности использования облегченного монолитного железобетонного внецентренно сжатого элемента.

Достоверность результатов исследования заключается в проведении экспериментальных исследований запроектированных моделей железобетонных монолитных внецентренно сжатых элементов по определению и сравнению показателей деформаций и несущей способности двух сечений в соответствии со всеми действующими нормами и правилами.

Личное участие автора. В проведенном исследовании Автор изготовил образцы моделей железобетонных колонн, в том числе бетонные кубики для определения класса бетона этих моделей колонн. Осуществлял уход за образцами в процессе их затвердевания, контролировал и создавал для них нормальные условия твердения. После этого, осуществил доставку образцов к месту их испытаний, в лабораторию архитектурно-строительного института ТГУ.

Под руководством научного руководителя провел экспериментальные исследования шести моделей монолитных железобетонных колонн. После проведения экспериментальных исследований провел анализ полученных результатов, оформил сравнительные линейные диаграммы по разным показателям. Обосновал эффективность использования несъемных пустотообразователей в монолитных железобетонных колоннах.

Апробация и внедрение результатов работы велись в течение всего исследования. Результаты проделанной работы были озвучены на следующих мероприятиях:

- Всероссийская студенческая научно-практическая междисциплинарная конференция «Молодежь. Наука. Общество», г. Тольятти, 18-22 декабря 2023 г.
- Научно-практическая конференция «Студенческие Дни науки в ТГУ», г. Тольятти, 1-30 апреля 2024 г.

На защиту выносятся:

- Анализ и сопоставление результатов испытаний моделей железобетонных колонн сплошного сечения и моделей колонн с несъемными сферическими пустотообразователями по показателям прочности и жесткости.
- Обоснование эффективности использования облегченной конструкции монолитной железобетонной колонны со сферическими пустотообразователями.

Структура магистерской диссертации. Работа состоит из введения, 5-ти глав, заключения, содержит 55 рисунков, 20 таблиц, список используемой литературы (55 источников). Основной текст работы изложен на 118 страницах.

Глава 1 Анализ основных типовых железобетонных колонн

1.1 Общие сведения о железобетонных колоннах

Железобетонная колонна – это вертикальный элемент здания или сооружения малого поперечного сечения, выполненного из бетонной смеси и арматурного каркаса. Колонны в строительстве в целом используются для создания рамной или связной конструкции. Колонна в конструкции здания служит для передачи нагрузки с вышележащих элементов здания на фундамент.

Железобетонные колонны бывают двух видов: центрально-сжатые колонны, работающие только на осевое сжатие и внецентренно-сжатые, воспринимающие изгибающий момент [27].

В строительном производстве железобетонные колонны классифицируются по двум параметрам:

- Форма сечения: квадратные, круглые, прямоугольные.
- Способ изготовления: сборные колонны, изготовленные в заводских условиях или монолитные колонны, изготовленные на строительной площадке.

1.1.1 Основные формы сечений железобетонных колонн

Прямоугольные колонны являются наиболее распространенными типами колонн. Они имеют прямоугольную или квадратную форму сечения и используются в различных типах строительства. Прямоугольные колонны обладают высокой прочностью и устойчивостью благодаря тому, что их сечения подстраиваются под определённые нагрузки действующие вертикально на ось колонны или с эксцентриситетом.

Колонны круглого сечения является необычными, но данный вид колонн также широко находит применение в строительстве. Они обладают высокой степенью устойчивости и могут выдерживать большие нагрузки. Также колонны круглого сечения имеют эстетичный и более сглаженный вид, что в свою очередь

придает зданию особый внешний вид. Но использование нестандартного сечения, а круглое сечение материально и трудозатратно, что в свою очередь удорожает строительство и это не особо экономически выгодно в некоторых случаях, потому что заказчику в первую очередь интересуют экономия, а в следующую эстетика.

Многогранные колонны имеют многоугольное сечение, такое как шестиугольник или восьмиугольник. Многогранные колонны являются редким явлением в строительстве, так такие колонны необходимы для достижения архитектурных решений, либо данное здание является уникальным и данное решение было проработано до мелочей, так как изготовление опалубки для таких элементов очень трудозатратно и в основном делается индивидуально на заказ специализированными заводами.

Композитные колонны состоят из сочетания различных материалов, таких как железобетон и сталь. Сочетание данных материалов обеспечивают высокую прочность колонн. Композитные колонны широко используются в больших промышленных и инфраструктурных проектах, где требуется высокая несущая способность и прочность, например здание «Лахта Центр».

Композитные колонны, используемые в «Лахта Центр», состоят из комбинации железобетона и стальных элементов. Это сочетание обеспечивает высокую прочность и устойчивость конструкции, позволяя зданию выдерживать огромные нагрузки при своей эстетической спиралевидной форме. Они создают эстетически привлекательный вид фасада здания и одновременно несут огромную нагрузку от ветра и этажей здания.

Подводя итоги по основным формам сечений железобетонных колонн, можно сказать, что каждый типовой вид колонн имеет свои преимущества и особенности, выбор которых в основном лежит от требований технического задания, экономической целесообразности, нагрузок и архитектурных предпочтений заказчика.

1.1.2 Сборные железобетонные колонны

Сборные железобетонные колонны изготавливают на заводах определённой серии. Каждая серия имеет область своего применения. Будь это строительство гражданских зданий или промышленное строительство. Все эти серии типовые и их на сегодняшний момент существует большое количество. Большинство серий направлены на определённые указания по применению типовых колонн, несут в себе узлы крепления к колоннам стропильных или подстропильных конструкций, соединений с фундаментами, подбора закладных деталей и многое другое. Каждая серия имеет свое применение. Например «Типовые серии по железобетонным колоннам» имеют порядка 19 серий. Также колонны данных серий подразделяются на сплошные и сквозные колонны [38].

Сплошные колонны в промышленных зданиях в основном применяются при применениях грузоподъемных механизмов до 30 тонн и относительно не большой высоте здания. Типовые сборные сплошные железобетонные колонны, применяемые в промышленном строительстве представлены на рисунке 1.

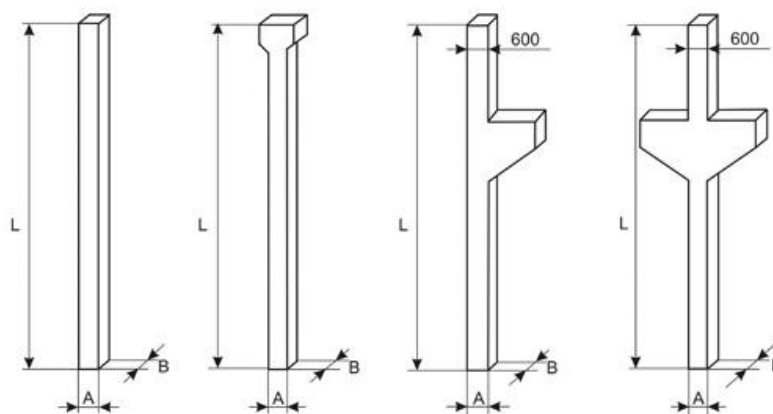


Рисунок 1 – Сплошные железобетонные колонны

Также существует отдельный экономически выгодный тип сборных колонн – сквозные колонны. В свою очередь они применяются при больших нагрузках грузоподъемных механизмов от 30 тонн и больше и относительно большей высоте здания, более 12 метров. Типовые сборные сквозные

железобетонные колонны, применяемые в промышленном строительстве представлены на рисунке 2.

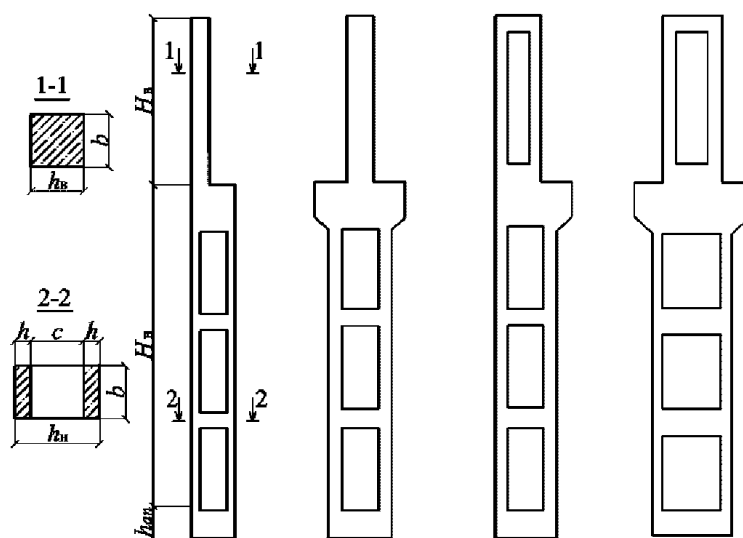


Рисунок 2 – Сквозные железобетонные колонны

Отличительной чертой сквозных колонн от полнотелых является наличие отверстий в теле бетона. Данные отверстия позволяют эффективно использовать габариты колонн и по сравнению со сплошной колонной, имеют меньший вес и близкие показатели несущей способности [43].

1.1.3 Монолитные железобетонные колонны

Железобетонные монолитные колонны – конструктивный элемент здания или сооружения, которые используются в строительстве для передачи нагрузок с вышележащих конструкций здания на нижележащие. Такие колонны отличаются от сборных тем, что монолитные железобетонные колонны возводят на строительной площадке, а сборные на заводах.

Главное преимущество железобетонных монолитных колонн – это их гибкость в проектировании. Они могут быть запроектированы в различных формах и размерах, что позволяет архитекторам и инженерам достичь разнообразных дизайнерских решений [46]. Кроме того, монолитные колонны обычно имеют гладкую поверхность, что улучшает их внешний вид и удобность

монтажа инженерных коммуникаций на них и возведения пристраиваемых сооружений и стен.



Рисунок 3 – Монолитные железобетонные колонны

Стоит отметить, что при проектировании таких конструкций самое важное – это соблюдение всех действующих норм и правил, чтобы избежать аварийной ситуации во время возведения и после, во время эксплуатации здания или сооружения.

1.2 Преимущества и недостатки сборных и монолитных колонн

При рассмотрении данной темы, можно сказать, что вышеперечисленная информация о сборных и монолитных колоннах не раскрывает до конца их стороны. Но, как и всегда, сборные и монолитные колонны имеют и сильные стороны и недостатки. Поэтому стоит уделить особое внимание для

рассмотрения всех положительных и отрицательных сторон использования конкретного вида или типа колонн.

1.2.1 Преимущества и недостатки сборных колонн

Сборные железобетонные конструкции представляют собой элементы, которые изготавливают на специализированных заводах, а затем доставляются на строительную площадку для дальнейшего монтажа.

Преимущества сборных колонн:

- Быстрая и удобная установка. Сборные колонны обычно изготавливаются на специализированных заводах и доставляются на строительный объект, что ускоряет процесс возведения, позволяя избежать ожидания набора прочности бетона, что особенно дорого производить в зимнее время года.
- Высокая прочность и качество сборных колонн. На заводах производство колонн является налаженным процессом с помощью типовых опалубок. Все это позволяет довольно точно размещать арматурные каркасы в тело железобетонной колонны, согласно проектным отметкам. Также помещения заводов позволяют создавать наиболее благоприятные условия для набора прочности бетона в любое время года.
- Экономически выгодно из-за массового производства сборных колонн и использования стандартных элементов их цена обычно ниже, чем у монолитных колонн.

Недостатки сборных колонн:

- Ограниченный выбор размеров и форм из-за стандартизации производства сборных колонн.
- Логистика. Сложность транспортировки колонн является наиболее распространённым фактором. Заводы по всей стране изготавливают типовые колонны согласно определенным сериям. И не все серии могут удовлетворять определенным проектным решениям. Колонны, которые производят в Краснодаре, могут не производить в Новосибирске и на

оборот. Или в нынешней экономической обстановке завод может обанкротиться, что в свою очередь может понести большие непредвиденные затраты.

1.2.2 Преимущества и недостатки монолитных колонн

Монолитное возведение зданий и сооружений в строительстве подразумевает в себе использование бетонной смеси на строительной площадке, либо при индивидуальном изготовлении непосредственно на строительной площадке, либо при заказе смеси на специализированных заводах, которая позволяет возводить здания и сооружения любой этажности и любой конфигурации в профиле и плане [34].

Преимущества монолитных железобетонных колонн:

– Гибкость в выборе размеров и форм, монолитные колонны могут быть изготовлены по индивидуальным требованиям проекта, что позволяет создавать уникальные архитектурные решения.

Недостатки монолитных железобетонных колонн:

– Большие затраты на строительство, изготовление монолитных колонн требует наличия специализированного оборудования, а именно опалубки, разновидность которой на сегодняшний момент только растет, квалифицированных рабочих, что повышает трудозатраты и стоимость возведения здания.

– Длительное время строительства, из-за необходимости лить колонны на месте строительства, процесс может занимать больше времени, чем установка сборных колонн, потому что для устройства вышележащих элементов, монолитным колоннам требуется набрать проектную прочность прежде, чем их нагружать.

В итоге, выбор между сборными и монолитными колоннами зависит от контурных условий проекта, бюджета и предпочтений заказчика.

1.3 Требования, предъявляемые к железобетонным колоннам

К железобетонным колоннам, как для сборных, так и для монолитных, всегда предъявлялись определённые требования о прочности, надёжности, экономической выгоды, безопасности.

«Колонны должны удовлетворять требованиям нормативных документов, действующих в период строительства:

- по прочности, жесткости и трещиностойкости;
- по показателям фактической прочности бетона в проектном возрасте и отпускной);
- по морозостойкости бетона, а для колонн, эксплуатируемых в условиях воздействия агрессивной газообразной среды, также по водонепроницаемости бетона;
- по маркам сталей для арматурных и закладных изделий, в том числе для монтажных петель;
- по толщине защитного слоя бетона до арматуры;
- по защите от коррозии» [1].

Для монолитных железобетонных колонн распространяются такие же требования, как и для остальных железобетонных монолитных конструкций, а именно:

- «исключение аварийных ситуаций разрушение отдельных несущих строительных конструкций; разрушение всего здания, сооружения или их части; деформации, перемещений либо потери устойчивости несущих конструкций, в том числе отклонений от вертикальности в процессе строительства);
- безопасность обеспечение надлежащей степени надёжности при различных расчетных воздействиях в процессе строительства и эксплуатации зданий и сооружений), исключение причинения вреда и здоровью граждан, имуществу и окружающей среде;

- эксплуатационная пригодность возведенные конструкции должны иметь такие характеристики, чтобы с надлежащей степенью надежности при различных расчетных воздействиях не происходило образования или раскрытия трещин и не возникало перемещений сверх допустимых значений, а также исключилось образование колебаний и других повреждений, затрудняющих их нормальную эксплуатацию);
- отсутствие недопустимых дефектов;
- обеспечение долговечности устанавливаются требования к бетонной смеси, бетону, арматуре и при этом конструкции должны иметь такие начальные характеристики, чтобы в течении установленного срока эксплуатации они удовлетворяли требованиям по безопасности и эксплуатационной пригодности, с учетом влияния на геометрические характеристики конструкций и механические характеристики материалов различных расчетных воздействий);
- обеспечение заданных проектных параметров» [2].

Железобетонные колонны являются одним из основных элементов конструкции здания и должны соответствовать требованиям нормативных документов.

Одно из самых важных требований – прочность. Железобетонные колонны должны обладать достаточной прочностью и надёжностью для выдерживания нагрузок, которые на них могут действовать. Это включает в себя статические нагрузки от веса здания и динамические нагрузки от ветра, сейсмической активности или других внешних факторов.

Устойчивость. Колонны должны быть спроектированы и возведены таким образом, чтобы обеспечить устойчивость здания при производстве работ и после при эксплуатации.

Геометрические характеристик. Колонны должны иметь определенную форму и размеры согласно проекту. Геометрические параметры колонн, такие как высота и сечение, должны быть точно определены и соблюдены. Потому что

проверка и приемка колонн проводится до миллиметров и любое отклонение будет является критическим и может повлечь за собой ряд затратных действий.

Пожарная безопасность (защитный слой). Железобетонные колонны должны обладать достаточной огнестойкостью, чтобы выдержать заданный период времени при пожаре. Для этого могут использовать специализированные огнезащитные покрытия или добавки в бетон, ну а также контроль защитного слоя бетона согласно СП 70.13330.2012 [42].

Долговечность. Колонны должны быть спроектированы и изготовлены таким образом, чтобы обеспечить их долговечность и минимальное влияние окружающей среды, такой как коррозия или воздействие химических веществ. Производственные процессы влияют на долговечность колонн, но также и влияет эксплуатационные требования. Если во время проектирования будут пренебрегаться какие-либо требования технического задания, все это может повлечь за собой снижение «срока жизни элемента» и на оборот. Если монолитная колонна была запроектирована на определённые условия, что изменения эксплуатационных условий могут критически отнестись к данному элементу [31].

Вывод по первой главе.

Железобетонные колонны в зданиях и сооружениях являются одним из важнейших конструктивных элементов. Колонны несут и передают нагрузку с вышележащих конструктивных элементов здания на нижележащие до фундамента. Также в совокупности с перекрытием они образуют каркас здания, который распределяет нагрузки и обеспечивает его целостность.

Рассмотрев различную литературу в сфере проектирования железобетонных колонн, можно сказать, что в большинстве случаев проектные решения направлены на рациональное использование материала в элементе, с учетом нормативных документов по проектированию этих элементов, для достижения необходимых требований для безопасной эксплуатации здания.

Наиболее интересным фактом является отсутствие информации по облегченным монолитным колоннам. Когда в сборных решениях существуют сквозные колонны, позволяющие увеличить сечение элемента с удалением части бетона. Но сборные железобетонные конструкции не всегда удобно применять в строительстве из-за ряда проблемных вопросов, их ограничениях в размерах и форме.

Исходя из вышеперечисленного, существует необходимость провести испытания облегченной монолитной конструкции железобетонной колонны, изучить несущую способность, трещиностойкость и жесткость, чтобы научным методом подтвердить эффективность применения данной конструкции железобетонной колонны.

В случае, если результаты испытаний окажутся положительными, облегченная железобетонная колонна с пустотообразователями, станет удобной, практичной и экономически выгодной конструкцией, которая позволит возводить сложные, но безопасные и комфортные здания и сооружения.

Глава 2 Подготовка к испытаниям

Целью данной главы является выбор наиболее подходящего метода проведения испытаний для железобетонных моделей, колонн со сферическими пустотообразователями при имеющейся технической базе, подготовка к испытаниям по программе согласно выбранному методу.

Перечень задач, необходимы для достижения цели:

- изучение и анализ необходимой научной литературы;
- анализ основных видов испытаний строительных конструкций;
- выбор необходимого вида и метода испытаний;
- подбор необходимых механизмов, оборудования, вспомогательных устройств для проведения испытаний;

2.1 Основные виды испытаний

На сегодняшний день существует большое количество разновидностей экспериментальных исследований, отличающихся друг от друга поставленными целями и задачами. Строительная сфера не исключение.

Разные конструктивные элементы строительных конструкций проверяются на прочность на сжатие и растяжение, некоторые – на морозостойкость, а другие – на водонепроницаемость. Поэтому, для эффективного проведения эксперимента, необходимо задать параметры, по которым будут проводиться исследования на экспериментальной установке, и убедиться, что техническая база университета может обеспечить необходимое оборудование для будущего эксперимента.

Экспериментальные исследования строительных конструкций могут быть разнообразными и варьироваться в зависимости от их назначения. Вот некоторые примеры экспериментальных исследований, которые могут быть проведены на строительных конструкциях.

Испытания на прочность. Они могут включать в себя испытания на разрушение или периодическое нагружение конструкций, чтобы определить максимальную нагрузку, которую конструкция может выдержать, или фиксацию деформаций при определённых нагрузках. Это может быть полезно при проектировании мостов, зданий или других конструкций, которые должны выдерживать большие нагрузки.

Испытания на устойчивость. Данные исследования в основном направлены на проверку устойчивости конструкций и сооружений при действии внешних факторов, вызванных такими явлениями, как ветровая нагрузка, снеговая нагрузка в различных её проявлениях или сейсмическая активность. Это всё помогает определить, насколько конструкция способна сопротивляться различным условиям и сочетаниям нагрузок, и самое важное – сможет ли обеспечить требуемую безопасность здания или сооружения.

Огнестойкость. Данные исследования проводятся для определения огнестойкости строительных конструкций, чтобы узнать, насколько долго они могут выдерживать высокие температуры без потери своих основных свойств. Это важно для обеспечения пожарной безопасности зданий.

Эксперименты с материалами. Данные исследования проводятся для оценки свойств материалов, используемых в строительстве, таких как бетон, сталь, дерево, кирпич и многие другие. Это может включать испытания на растяжение, сжатие, изгиб или другие механические свойства материалов. Данные исследования зачастую проводятся для определения фактических технических характеристик материалов конструкций, чтобы перед вводом здания или сооружения в эксплуатацию убедиться в правильности использования материала и достижении всех требований, прописанных в проектной документации.

Исследования звукоизоляции и теплоизоляции. Данные испытания направлены на определение эффективности строительных конструкций или материалов в предотвращении проникновения звука, а также сохранении тепла

или холода внутри или снаружи здания или сооружения. Это важно для создания комфортных и энергоэффективных условий в зданиях и сооружениях.

Исследования на долговечность. Данные испытания проводятся, чтобы оценить долговечность строительных конструкций и их способность сохранять свои характеристики в течение длительного времени эксплуатации здания под влиянием различных условий. Это позволит определить срок службы конструкций или определённых материалов, а также определить необходимость проведения текущих или капитальных ремонтов или замены конструктивных элементов.

Вышеперечисленные исследования и испытания являются лишь некоторыми примерами экспериментальных исследований, которые могут быть проведены для строительных конструкций или материалов. Конкретные исследования будут зависеть от типа конструкции, её назначения и целей исследования [6].

Для достижения поставленных целей, перед нами стоит необходимость в проведении экспериментальных испытаний железобетонных колонн. Существует несколько методов, которые можно использовать при проведении экспериментальных испытаний железобетонных колонн [33].

Одним из таких методов является метод нагрузочных испытаний. Этот метод включает в себя нагружения испытуемого образца и измерений его реакций (прогибов, деформаций и т.п.) на эту нагрузку. Это может быть сделано с помощью гидравлического пресса, грузов или других устройств для нагрузки. Измерение деформаций, напряжений и прочности данным методом испытуемых образцов позволяет определить его поведение и характеристики под влиянием этих нагрузок.

Методы вибрационных испытаний. Данный метод включается в себя подверганию испытуемого образца вибрационным нагрузкам и измерение его реакции на эти нагрузки. Это может быть сделано с помощью вибрационных столов или других специализированных устройств. Испытания на вибрацию позволяют изучать динамическое поведение испытуемого образца и его

устойчивость к внешним воздействиям. В большинстве случаев данные испытания проводятся для конструктивных элементов, непосредственно работающих в таких условиях.

Методы разрушающих испытаний. Данный метод включает в себя нагружение испытуемого образца до разрушения с целью изучения его прочности и поведения при разрушении, а также фиксации характера разрушения [4]. Разрушающие испытания могут проводиться с помощью прессов, гидравлических молотов или других специализированных устройств или установок. Этот метод позволяет получить информацию о предельной прочности испытуемого элемента.

Методы неразрушающего контроля. Данные методы направлены на использование различной техники и приспособлений для оценки состояния и качества испытуемых образцов без их разрушения. Например, это может быть использование ультразвукового контроля, радиографии или других методов. Неразрушающий контроль позволяет обнаружить дефекты или повреждения в конструктивных элементах здания или сооружения без их разрушения.

2.2 Подходящий под условия и техническую базу вид испытания

В связи с тем, что в любом испытании в первую очередь стоит экономическая целесообразность, следовательно, наилучшим вариантом для проведения испытания является испытание моделей конструкций уменьшенного масштаба. Ко всему, этот вид испытаний подходит под техническую базу университета. Испытание модели призмы проводится статической нагрузкой [9].

Определение призмной прочности и начального модуля упругости с помощью комбинируемого метода испытаний, а именно нагрузочных испытаний и в последующем разрушающим методом. С помощью метода нагрузочных испытаний будут определены деформации при определенных нагрузках, момент трещинообразования и заключительным этапом будет фиксация разрушающей нагрузки и определен характер разрушения [30]. С помощью этих

методов мы сможем сопоставить полученные значения и сравнить два типа сечений колонн.

2.3 Установка для проведения испытаний

Исходя из требуемых условий для испытания колонны, принимаем гидравлический пресс П-250. Данный пресс имеется в строительной лаборатории института. Прессы испытательные гидравлические П-250 предназначены для испытаний образцов изделий строительных материалов на сжатие образцов бетонов по ГОСТ 10180-2012 [15], кирпича и других строительных материалов по ГОСТ 12801-98 [18] и др.

Прессы П-250 оснащены силоизмерителем. Отображение создаваемой на образец нагрузки выводится на аналоговый циферблат. Нагружающий модель прессы оснащены двумя вертикальными колоннами, с помощью центрального винта вручную перемещается подвижная траверса.

Поставленная задача решается тем, что на нижнюю платформу прессы устанавливается модель колонны в вертикальном положении. С помощью верхней траверсы они зажимаются между двумя площадками прессы. Нагружая модели колонн с неким эксцентриситетом. Нагрузки и деформации приборов будут записываться в журнале испытаний и в последующем сравниваться.

Для измерения относительных деформаций в арматуре применяются индикаторы часового типа по ГОСТ 577-68 [11], а для измерения относительных деформаций в бетоне тензометры Гугенбергера по ГОСТ 28836-90 [25].

Для количественной оценки и измерения величин деформаций должны использоваться специальные измерительные приборы и инструменты, которые позволят производить измерения с большой точностью. Данные приборы должны устанавливаться в паре, чтобы избежать критических погрешностей и иметь возможность для сравнения показателей данных приборов.

Принятая установка для проведения испытаний, позволяет проводить необходимые наблюдения и измерения на визуально удобной заданной высоте.

2.4 Описание образцов и требования к ним

Для проведения испытания была выбрана следующая модель испытываемого образца, железобетонная монолитная колонна в виде призмы размером сечения 150×150 мм и высотой 900 мм с консолями в опорных частях модели, для передачи нагрузки с большим эксцентриситетом.

Образцы будут изготавливаться двух типов сечения под три различных эксцентриситета. Модели эталонного сечения, а именно сплошного будут изготовлены в количестве трех штук и исследуемые модели со сферическими пустотообразователями в количестве трех штук [37]. Данное решение по применению эталонного сечения необходимо для лучшего сравнения.

Образцы необходимо изготовить из бетона класса В15, заполнителем для бетонной смеси послужит гравийный щебень фракции 5-20 мм, строительный песок, который необходимо проверить на отсутствие в нем примесей и мусора, вода, в которой не должно быть наличие химических соединений и примесей, которые могут замедлить сроки схватывания цемента [13].

Данные запланированных испытаний, описываются в третьей главе магистерской диссертации.

Для армирования колонн принимаем арматуру класса А500 диаметром 10 мм, модели колонн армируются пространственными каркасами.

Геометрические параметры и параметры армирования испытываемых образцов, отобранных для контрольных испытаний, не должны превышать предельных значений, указанных в ГОСТ 13015-2012 [19].

В бетонных изделиях не допускается наличие дефектов в виде трещин с размерами больше тех, что установлены согласно ГОСТ 13015-2012 [19].

Кроме того, неприемлемо наличие сколов, каверн и раковин, находящихся на предположительно сжатой поверхности во время испытания, глубина которых больше 20 мм. Также недопустимы различные дефекты участков, нарушенного сцепления арматуры.

Прочность бетона будет определяться методами определения предела прочности бетонов на сжатие путем испытаний специально изготовленных контрольных образцов-кубов по ГОСТ 10180-2012 [15] и ГОСТ 18105-2018 [20].

2.5 Методика проведения испытаний

Вид опираемого образца и характер его нагружения выбирается таким образом, чтобы он соответствовал условиям работы изделия в конструкции здания или сооружения на стадии эксплуатации и при испытаниях по этой схеме достигались контролируемые предельные состояния [54].

Образец для будущих испытаний схематически указывается как на шарнирно-неподвижно опоре – площадка пресса, сверху шарнирная опора – подвижная траверса пресса.

Краткий алгоритм испытания всех образцов моделей колонн будет следующим:

- Установка образца на нижнюю платформу пресса;
- Размещение измерительных приборов;
- Подведение к верхней пятке колонны подвижной траверсы пресса на максимально короткое расстояние;
- Ступенчатое нагружение образца до разрушения с проведением замеров и их фиксацией.

2.6 Техника безопасности при проведении испытаний

При выполнении работ с установкой для достижения безопасного проведения эксперимента должна соблюдаться техника безопасности. Техника безопасности должна соблюдаться на всем промежутке проведения экспериментальных исследований [53]. Для этого ниже кратко описана вся необходимая информация.

2.6.1 Техника безопасности перед началом выполнения работ

Перед началом проведения работ людям принимающим испытания следует надеть спецодежду и проверить на ней отсутствие развевающихся концов, рукава должны быть спущены, убраны свисающие детали, защитные очки и другие средства индивидуальной защиты должны быть без повреждений и загрязнений [21].

Необходимо тщательно осмотреть и подготовить место работы – убрать все лишние и мешающие предметы, проходы должны быть свободны. Особенно важно также максимально удобно и безопасно расположить необходимые для работы предметы и приспособления [51]. Освещение должно быть достаточным для проведения всех работ, пол должен быть чист в соответствии с санитарно-гигиеническими требованиями, быть не скользящими. Все инструменты, механизмы и приспособления, примыкающие к полу, должны быть надежно закреплены к нему, на их корпусе не должно быть трещин и каких-либо повреждений.

Для того чтобы избежать случайного соскальзывания и падения модели колонны во время проведения испытания, необходимо во время установки и снятия модели колонны аккуратно со страховкой придерживать колонну до нагружения и полного снятия с прессы.

Перед проведением эксперимента, необходимо убедиться в исправности экспериментальной установки и измерительных приборов.

2.6.2 Техника безопасности во время работы

Во время работы с установкой испытателю важно сохранять внимательность, не допускать нахождения рядом с ней посторонних лиц.

Необходимо следить, чтобы испытываемые модели колонн были установлены без перекоса и также, чтобы возможный перекос был исключен при проведении испытаний.

При непосредственном проведении испытаний запрещено удерживать образцы руками и держать руки вблизи рабочей зоны. Необходимо находиться в

безопасной зоне. Недопустимо применять самодельные инструменты, механизмы или приспособления.

Смена образцов должна производиться только при поднятой подвижной верхней траверсы прессы и под руководством научного руководителя.

Обязательно необходимо либо закрепить колонну в прессе или снять ее с прессы в случае ухода с рабочего места.

По окончании работ грузовая нагрузка должна быть снята с испытываемой модели колонны, модель должна быть убрана, рабочее место должно быть приведено в порядок, установка должна быть очищена от загрязнений.

Выводы по второй главе.

Основной целью второй главы является рассмотрение всех видов испытаний и из перечисленных выбрать подходящий метод проведения испытаний железобетонных колонн при имеющейся технической базе университета.

Для достижения поставленной задачи были изучены и проанализированы необходимые литературные источники, описаны основные виды испытаний применимые в строительной сфере, подобраны необходимые виды и методы испытаний моделей железобетонных колонн исходя из имеющейся технической базы и рационального траты материалов и способности проведения испытаний. И самой главной и неотъемлемой частью данной главы – техника безопасности. Описание техники безопасности при проведении испытаний позволит избежать несчастных случаев и травмирования участников экспериментальных исследований.

Глава 3 Программа экспериментальных исследований модели железобетонной колонны

В рамках магистерской диссертации предусмотрена разработка методики проведения экспериментального исследования моделей железобетонных колонн сплошного сечения и с пустотообразователями с различными эксцентриситетами и проведения сравнительного анализа теоретических и экспериментальных значений.

Программа экспериментальных исследований модели железобетонной колонны выглядит следующим образом:

- а) Подготовительный этап:
 - 1) Определение целей и задач эксперимента.
 - 2) Выбор параметров для изучения (прочность, деформация, устойчивость, величина раскрытия трещин и т.д.).
 - 3) Разработка модели железобетонной колонны, определение размеров призмы, формы, характеристик материалов.
 - 4) Описание экспериментальной установки и приборов для проведения эксперимента.
 - 5) Теоретическое описание эксперимента.
 - 6) Теоретический расчет модели колонны по прочности, по образованию нормальных трещин.
- б) Изготовление и подготовка модели:
 - 1) Подготовка опалубки для отливки моделей 2 типов.
 - 2) Изготовление пространственного арматурного каркаса.
 - 3) Устройство арматурного каркаса в опалубку и заливка бетонной смеси.
 - 4) Заливка кубиков для определения фактической прочности бетона.

- 5) Выдержка моделей колонн в условиях, соответствующих реальным эксплуатационным с фиксацией значений окружающей среды.
- в) Испытания на деформации и прочность:
- 1) Нагрузочные испытания, включающие нанесение постепенно увеличивающейся нагрузки на модели.
 - 2) Применение постоянной нагрузки на модели и измерение деформаций в течение определенного времени.
 - 3) Измерение деформаций, напряжений и прочности при различных уровнях нагрузки.
 - 4) Изучение поведения моделей колонн при постоянных нагрузках и оценка их устойчивости.
 - 5) Запись результатов и анализ полученных данных.
- г) Анализ результатов:
- 1) Сравнение полученных данных с теоретическими и требованиями нормативных документов.
 - 2) Оценка прочности, деформаций, устойчивости и трещиностойкости.
 - 3) Определение соответствия результатов заданным параметрам и целям испытаний.

3.1 Цель и задачи экспериментального исследования модели железобетонной колонны

В ходе выполнения магистерской работы планируется решить следующие основные задачи:

- изучить и проанализировать научную и специальную литературу по данной тематике;
- ознакомиться с основными видами проведения экспериментальных исследований колонн на внецентренное сжатие;

- описать имеющуюся на базе университета экспериментальную установку и приборы;
- дать теоретическое описание проведения испытания модели железобетонной колонны;
- разработать модели железобетонных колонн сплошного сечения и с пустотообразователями;
- произвести теоретический расчет по прочности и по образованию нормальных трещин.

3.2 Модели экспериментальных образцов

Для реализации поставленной цели и задач используется железобетонная призма из тяжелого бетона, квадратного сечения с консолями в опорных частях, армированного пространственным каркасом. Модель экспериментального образца сплошного сечения и с пустотообразователями представлена на рисунке 4 и 5.

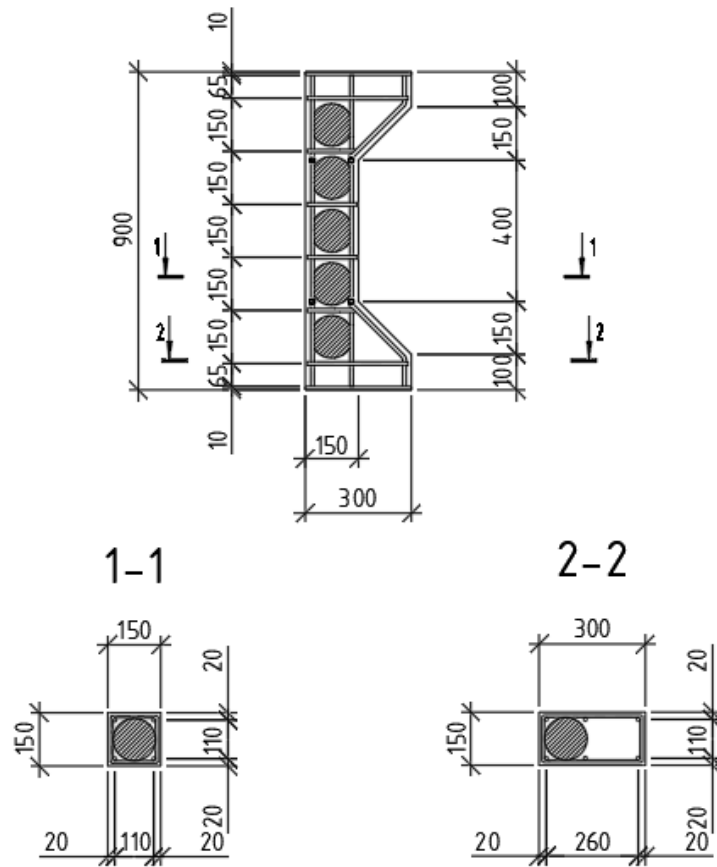


Рисунок 4 – Модель железобетонной колонны с пустотообразователями

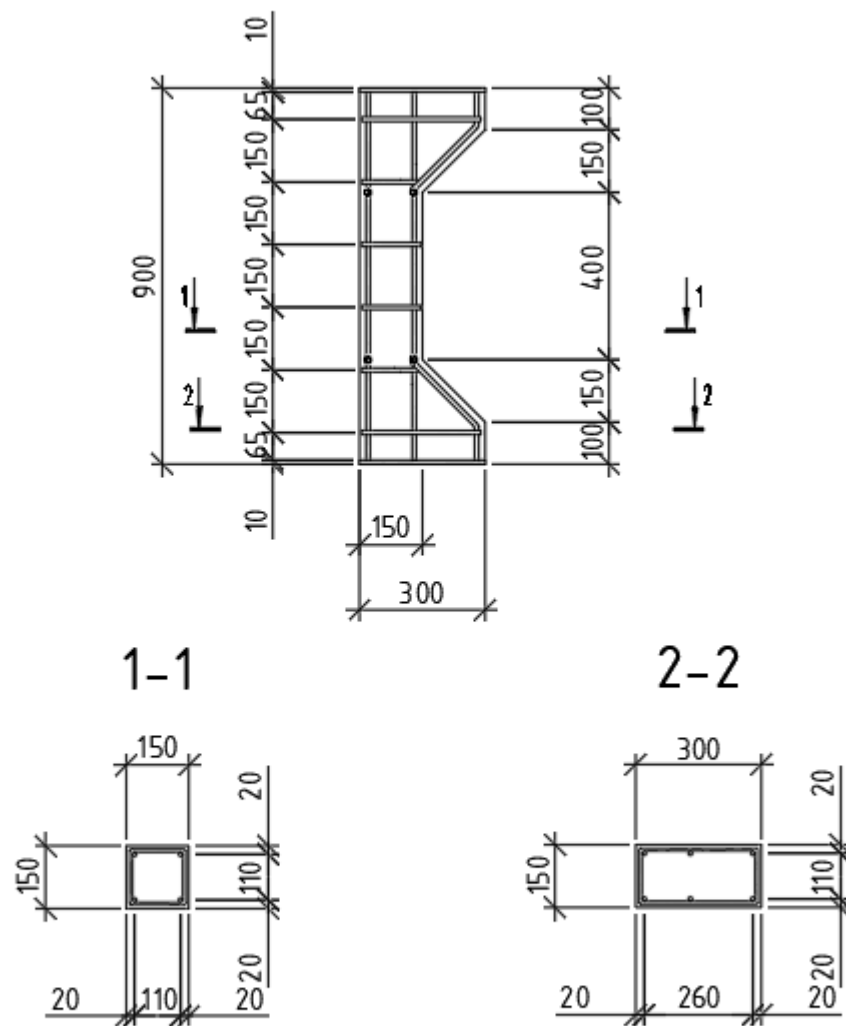


Рисунок 5 – Модель железобетонной колонны сплошного сечения

3.3 Экспериментальная установка и приборы

Экспериментальная установка — это специально созданное оборудование или система, используемая для проведения научных исследований и экспериментов. Она обычно состоит из различных компонентов, таких как приборы, сенсоры, измерительные устройства, а также системы управления и контроля. Экспериментальная установка позволяет ученым и исследователям

создавать и контролировать определенные условия, чтобы изучать и проверять различные гипотезы и теории.

Для проведения опыта мы воспользуемся гидравлическим прессом П-250 (см. рисунок 6), который специально предназначен для испытания строительных материалов на сжатие. Основные технические характеристики экспериментальной установки представлены в таблице 1. Этот пресс оснащен торсионным силоизмерителем, который позволяет нам контролировать прикладываемую нагрузку. Результаты нагрузки отображаются на двухдиапазонном циферблате, а контроль нагрузки осуществляется с помощью шкалы силоизмерителя, интегрированной в систему гидравлического пресса.



Рисунок 6 – Гидравлический пресс П-250

Таблица 1 – Технические характеристики экспериментальной установки

Характеристика	Значение
1	2
Наименование	Гидравлический пресс П-250
Тип привода	Электрогидравлический
Тип силоизмерителя	Торсионный
Отображение данных испытания	Аналоговый циферблат
Диапазон измерений (основной/дополнительный), кН	250-1250/500-2500
Погрешность при нагружении, %	± 2
Рабочий ход гидравлического поршня, мм	50
Высота рабочего пространства, мм	1000
Максимальная скорость перемещения поршня, мм/мин	20
Расстояние между колоннами, мм	530
Размеры плит сжатия, мм	500 × 500
Габаритные размеры, мм	2100x900x2715
Масса испытательной машины, т	3,53
Мощность, кВт	3,5

На данной экспериментальной установке будут проводиться испытания моделей железобетонных колонн сплошного сечения и с пустотообразователями при внецентренном сжатии.

Испытание железобетонных колонн при внецентренном сжатии – это процесс проверки прочности и деформационных характеристик колонны при наличии внешней нагрузки, которая не приложена к ее главной оси [12]. В данном случае, внецентренное сжатие означает, что нагрузка приложена не по центру колонны, а смещена относительно этой оси [5].

Также на этом прессе будет определена кубиковая прочность бетона. Данная характеристика необходима для выявления фактической прочности бетона и дальнейшего сравнения экспериментальных значений двух моделей между собой и теоретическими расчетами [52].

Измерений контрольных размеров длины и сечения испытуемых образцов будет проводиться рулетной и штангенциркулем. Относительные деформации сжатия и растяжения арматуры – индикаторами часового типа, относительные деформации сжатия и растяжения бетона – тензомером Гугенбергера [38].

3.4 Теоретическая информация по проведению испытания модели железобетонной колонны

Во время проведения эксперимента будет несколько варьируемых факторов и несколько статических [35]. Все это необходимо для более точного сравнения двух моделей и определение их прочности.

Неизменные факторы:

- класс бетона;
- класс арматура и диаметр арматурных стержней;
- геометрические формы модели.

Так, например, варьируемые факторы, могут быть следующими:

- наличие пустот;
- величина эксцентриситета приложения нагрузки;
- характер нагружения.

Схема нагружения определена задачами исследования. Оси опорных цилиндрических шарниров смещены относительно геометрической продольной оси модели колонны на величину эксцентриситета e_0 , равную 75 мм, 150 мм и 212,5 мм. Эксцентриситет приложения нагрузки превышает размеры радиуса инерции сечения – случай больших эксцентриситетов [10].

Схема нагружения экспериментального образца приведена на рисунке 7.

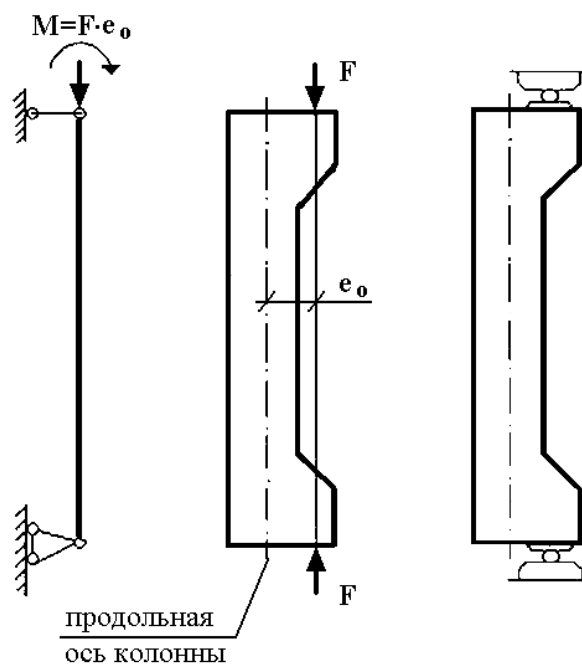


Рисунок 7 – Схема нагружения модели колонн

Перед началом испытания необходимо провести контрольные измерения длины колонны, длины участка с постоянным сечением и геометрических размеров сечения [32]. Полученные данные записываются в журнал испытаний. Для измерения горизонтальных перемещений колонны и относительных деформаций используются специальные приборы, такие как тензомер Гугенбергера для бетона и индикаторы часового типа для относительных деформаций арматуры [29]. Расположение приборов на физической модели колонны показано на рисунке 8. Также делается запись о базе измерений деформаций и расстоянии между растянутыми и сжатыми волокнами [44].

Нагрузка на колонны разных сечений будет воздействовать с 3-мя разными эксцентриситетами равными 75 мм, 150 мм и 212,5 мм. Схемы нагружения представлены на рисунках 9, 10, 11.

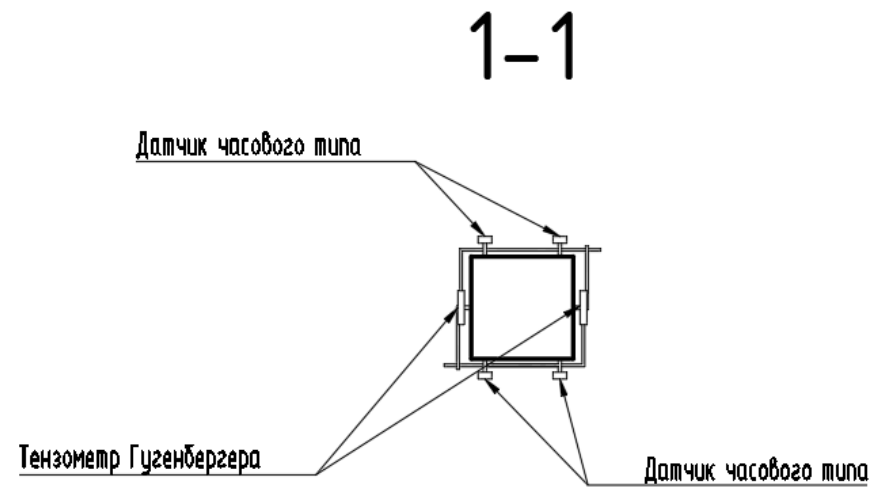
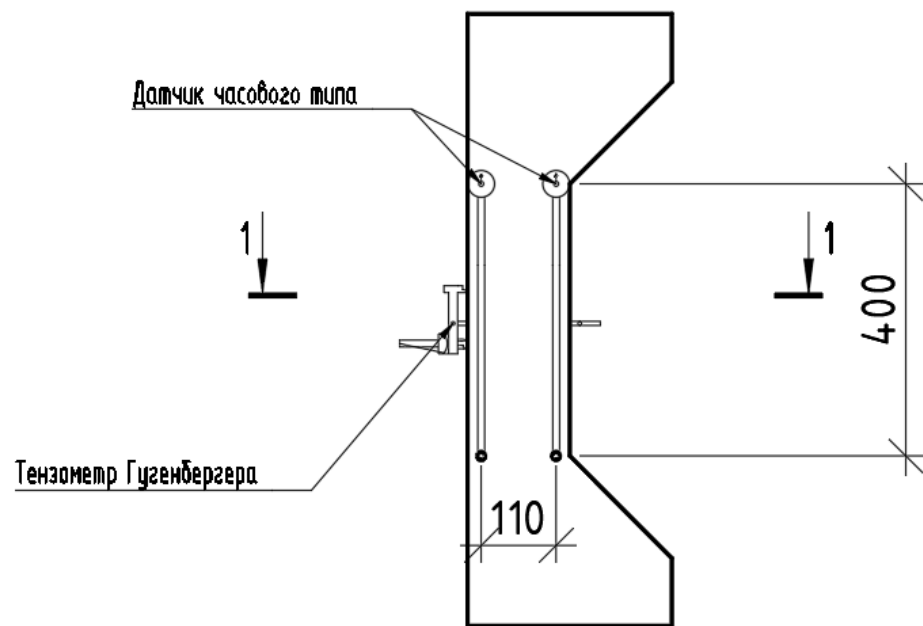


Рисунок 8 – Схема расстановки приборов на экспериментальной модели при испытании колонны на внецентренное сжатие

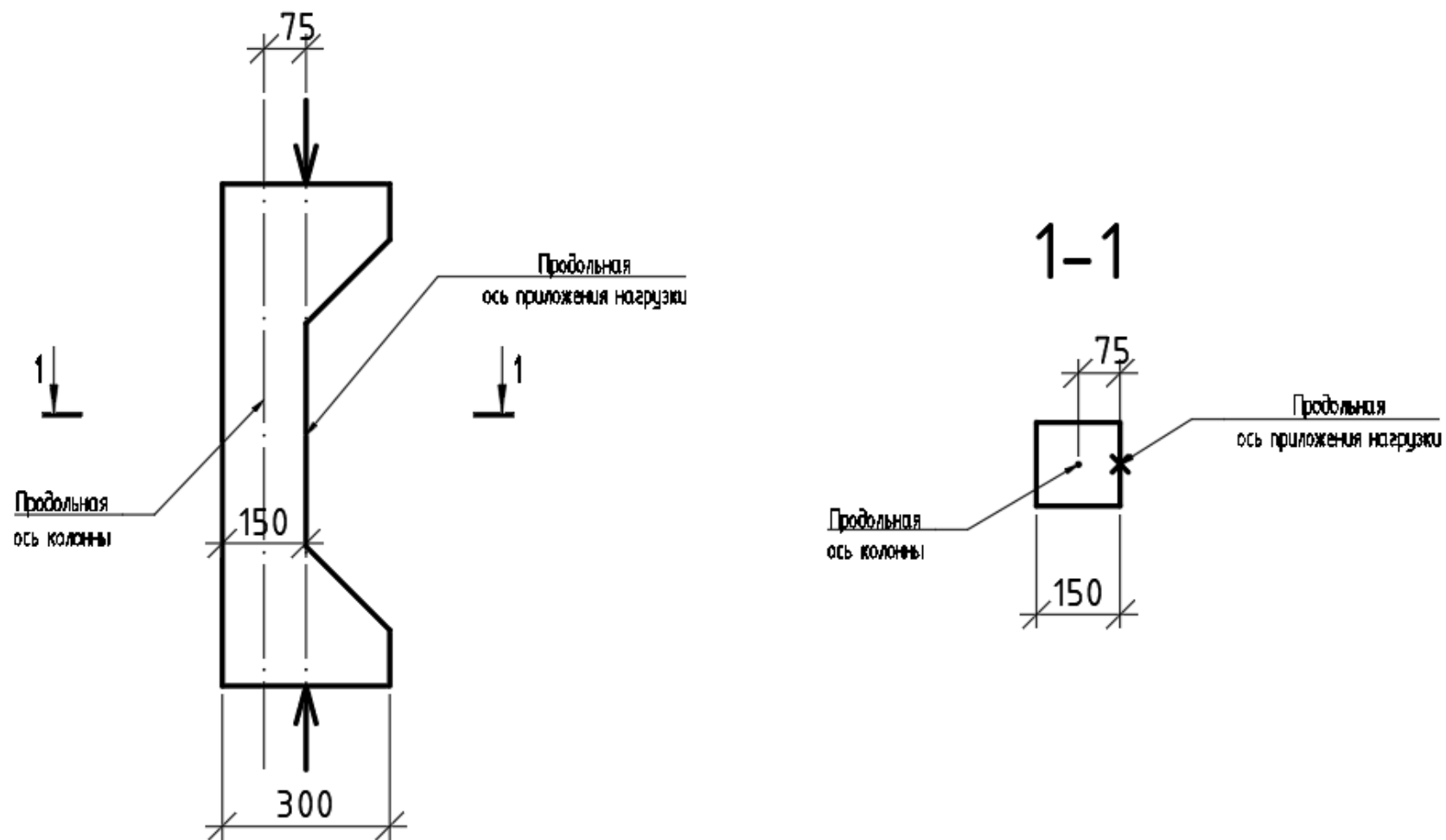


Рисунок 9 – Схема нагружения колонн с эксцентриситетом 75 мм

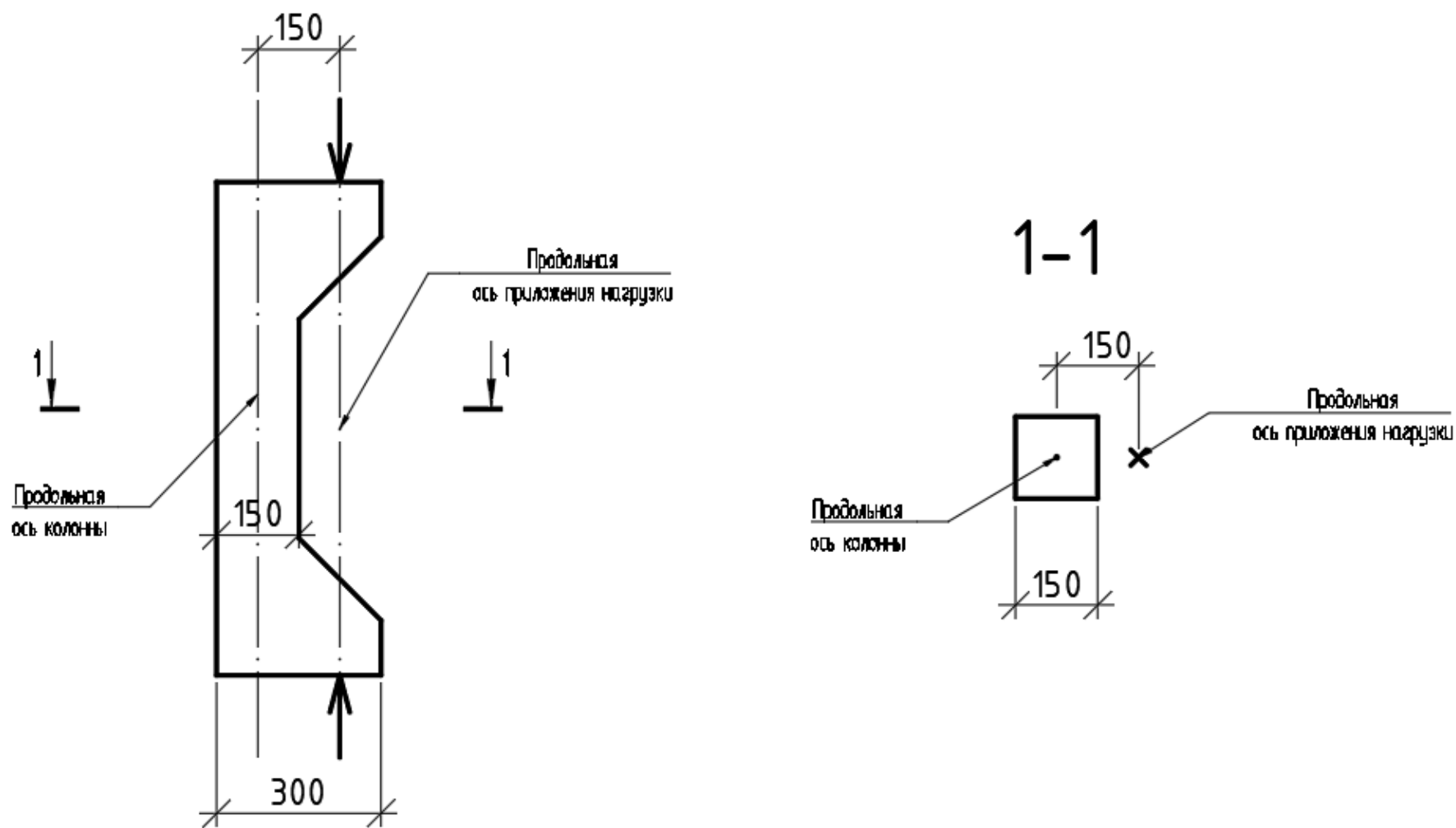


Рисунок 10 – Схема нагружения колонн с эксцентриситетом 150 мм

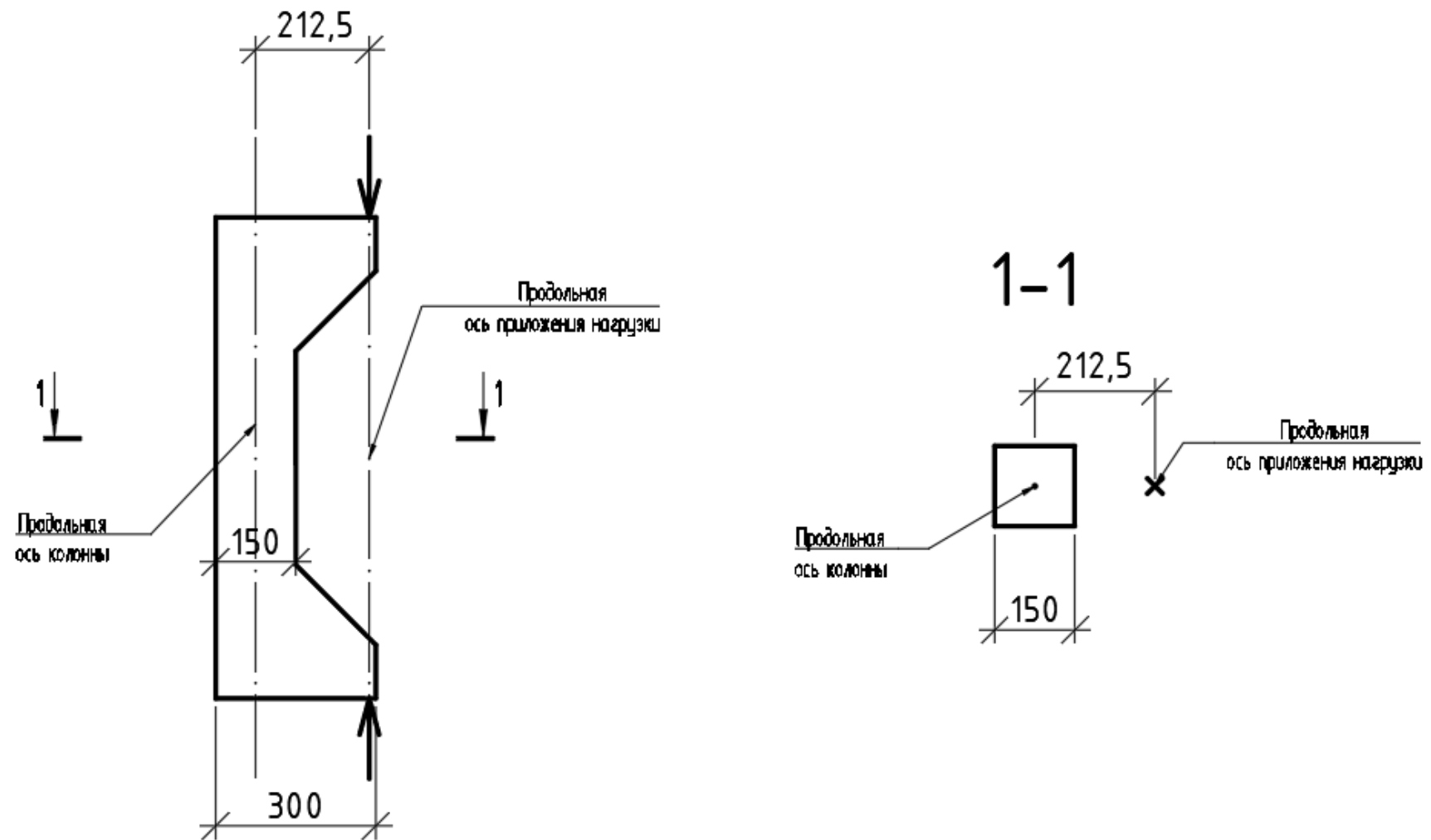


Рисунок 11 – Схема нагружения колонн с эксцентриситетом 212,5 мм

Перед началом нагружения модели колонны проводится осмотр, в ходе которого обнаруживаются дефекты в бетоне. Затем, с помощью прогибомеров и индикаторов, измеряются начальные отклонения, и все полученные данные заносятся в журнал испытаний.

Загружение колонны происходит поэтапно. Во время каждого этапа нагружения испытательной нагрузкой, показания манометра и измерения приборов фиксируются в ведомости испытаний. Также отмечается момент, когда начинают образовываться продольные трещины [40].

В процессе испытания модели колонны можно наблюдать три стадии напряженно-деформированного состояния в ее нормальном сечении. На начальном этапе, напряжения в бетоне и арматуре незначительны [26]. Затем в растянутой зоне бетона начинают развиваться неупругие деформации, и напряжения приближаются к пределу прочности бетона на растяжение. В этой зоне образуются трещины, сначала в верхней и средней частях, а затем по всей длине участка с постоянным сечением колонны. Работоспособность бетона и арматуры нарушается в местах трещин [8]. Высота сжатой зоны сечения постепенно уменьшается, а ширина трещин увеличивается. Стадия заканчивается, когда в растянутой арматуре появляются заметные неупругие деформации и напряжения достигают физического предела текучести. При увеличении изгиба колонны, эксцентриситет также увеличивается, что приводит к увеличению изгибающего момента [28].

Данные вид испытаний также могут быть применены ко всем видам бетонов, указанным в ГОСТ 25192-2012 [24], которые находят применение в различных областях строительства зданий и сооружений. Исключением для этой технологии являются специальные виды бетонов, например ячеистый бетон, для них предусмотрены другие стандарты [22].

Вывод по третьей главе.

В рамках третьей главы магистерской диссертации была разработана программа экспериментальных исследований железобетонных колонн с пустотообразователями, разработаны модели железобетонных колонн разных сечений, прописаны этапы с подробными действиями для достижения положительного результата, прописаны цели и задачи эксперимента, выбраны параметры для изучения, подобраны измерительные приборы для определения деформаций в бетоне и арматуре, разработана схема с расстановкой данных приборов, прописаны ожидаемые результаты проведения экспериментального исследования.

Глава 4 Подготовка моделей колонн к проведению испытаний

4.1 Изготовление образцов для испытания

Модель колонны, представленной в данной диссертации, разработана на основе железобетонной колонны сплошного сечения в виде призмы геометрическими размерами $150 \times 150 \times 900$ мм, которая армируется арматурными стержнями класса А500 диаметром 10 мм, с консолями в опорных частях, для нагружения этих колонн с эксцентриситетом.

Перед изготовлением моделей колонн, они были запроектированы в программе AutoCAD. В этой программе были просчитаны и визуализированы все необходимые элементы моделей колонн, чтобы было возможно осуществить рациональную закупку строительных материалов и предварительно выполнить расчет для определения несущей способности и деформации при разных этапах нагружения для сравнения и корректировки данных.

Модели колонн с пустотообразователями и сплошного сечения по своему внешнему виду не будут иметь отличительных черт. Их главное отличие – наличие пустот. Поэтому для изготовления шести опалубок понадобится один типоразмер этих опалубок. Высота опалубки будет равна высоте сечения, то есть 150 мм. Геометрические параметры опалубки в плане представлены на рисунке 12.

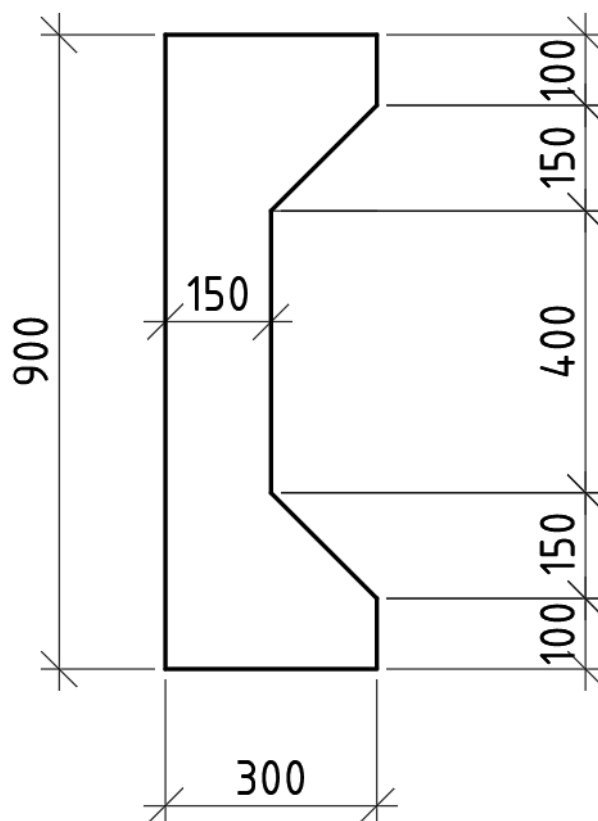


Рисунок 12 – Геометрическая форма опалубки

4.2 Изготовление опалубки

Для получения образцов моделей железобетонных колонн было изготовлено шесть форм – деревянные опалубки из фанеры толщиной 10 мм.

Для начала на листе фанеры были отчерчены все необходимые составляющиеся для сборки опалубки. После при помощи циркулярной пилы были нарезаны все отмеренные детали. Также для сборки и фиксации отдельных частей опалубки и сохранения пространственной жесткости необходим брус сечением 50 × 50 мм. Он также был нарез при помощи циркулярной пилы.

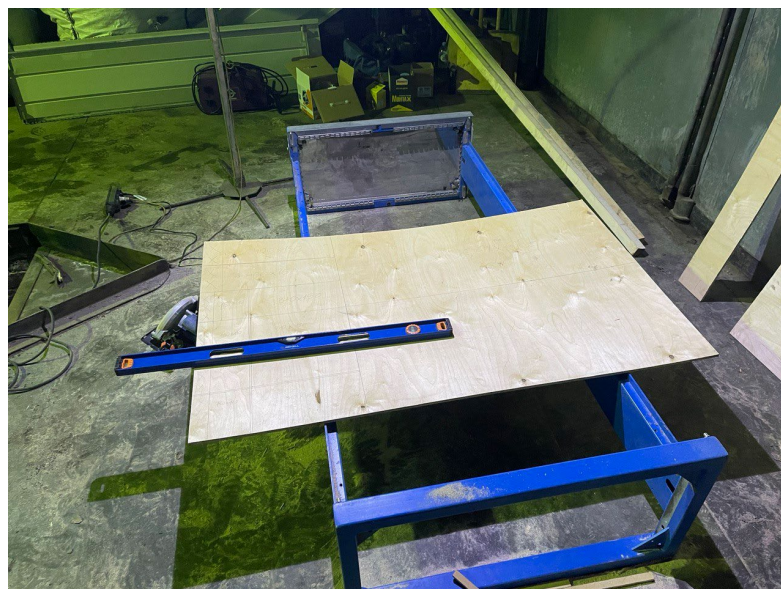


Рисунок 13 – Разметка деталей на фанере



Рисунок 14 – Готовые детали опалубки

После проделанных этапов, причисленных выше, можно приступить к сборке опалубки. Детали опалубки, показанные на рисунке 11, необходимо прикрепить к брусу при помощи саморезов, для того чтобы их можно было удобно установить на листе фанере, на котором заранее начерчены геометрические размеры опалубки, указанные на рисунке 15.



Рисунок 15 – Сборка опалубки

Всю опалубку необходимо пронумеровать для того, чтобы в будущем не перепутать модели колонн.



Рисунок 16 – Готовая опалубка

После сборки основных элементов опалубки, а также после сборки каркасов, необходимо разместить все арматурные каркасы в опалубку, для фиксации углов опалубки металлическими уголками, для достижения максимальной надежности опалубки, чтобы при монолитных работах, каркас опалубки не разрушился, и вся бетонная смесь не вышла наружу.

После фиксации углов, все видимые стыки опалубки необходимо запенить монтажной пеной для того, чтобы во время заливки бетонной смеси в опалубку, из щелей не вытекало «бетонное молочко», так как эта жидкость необходима для химического процесса застывания бетона.

На рисунке 17 представлена опалубка с закрепленными углами и заделанными швами монтажной пеной.



Рисунок 17 – Усиление и изоляция швов опалубки

Через сутки, после застывания монтажной пены, ее необходимо срезать.

4.3 Изготовление арматурного каркаса

Армирование колонн представляет из себя пространственный каркас. Для пространственного каркаса применяется арматура класса А500. Продольная и поперечная арматура принимается одного класса и одного диаметра.

Количество образцов и геометрические характеристики приведены в таблице 2. Спецификация материалов приведена в таблицах 3 и 4.

Таблица 2 – Перечень испытываемых образцов

Наименование образца	Эксцентриситет, мм	Класс бетона	Класс арматуры	Количество образцов, шт
1	2	3	4	5
Колонна сплошного сечения	75	B15	A500	1
Колонна пустотами с				1
Колонна сплошного сечения	112,5	B15	A500	1
Колонна пустотами с				1
Колонна сплошного сечения	150	B15	A500	1
Колонна пустотами с				1

Схема армирование колонн сплошного сечения представлена на рисунке 18.

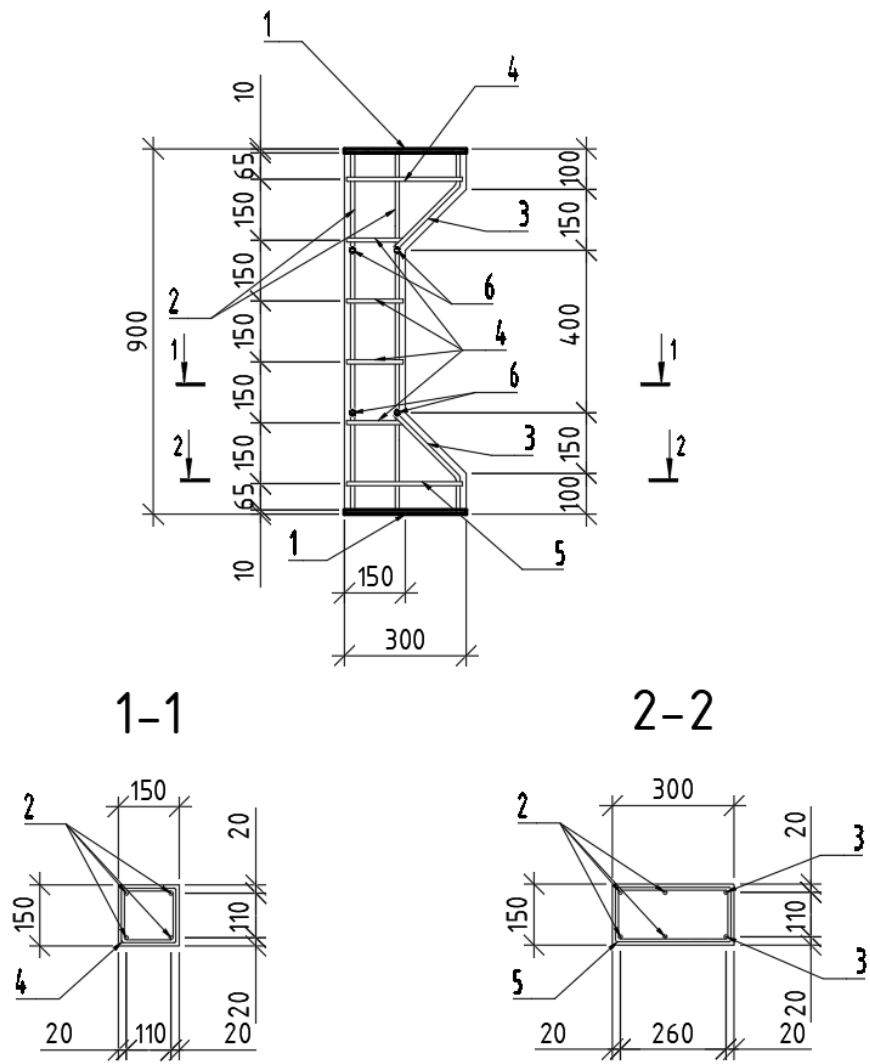


Рисунок 18 – Схема армирования колонны сплошного сечения

Таблица 3 – Спецификация материалов для армирования моделей колонн

Поз.	Наименование	Количество, шт.	Примечание
1	Металлическая пластина 150 × 300 × 10	2	Для усиления опорных частей
2	∅10 А500 L = 880 мм	4	Продольная рабочая арматура
3	∅10 А500 L = 320 мм	4	Продольная рабочая арматура
4	∅10 А500 L = 500 мм	4	Поперечная рабочая арматура (хомут)
5	∅10 А500 L = 750 мм	2	Поперечная рабочая арматура (хомут)
6	Переходная гайка М8	8	Для крепления приборов измерения

Схема армирования колонн и расположения сферических пустотообразователей представлена на рисунке 19.

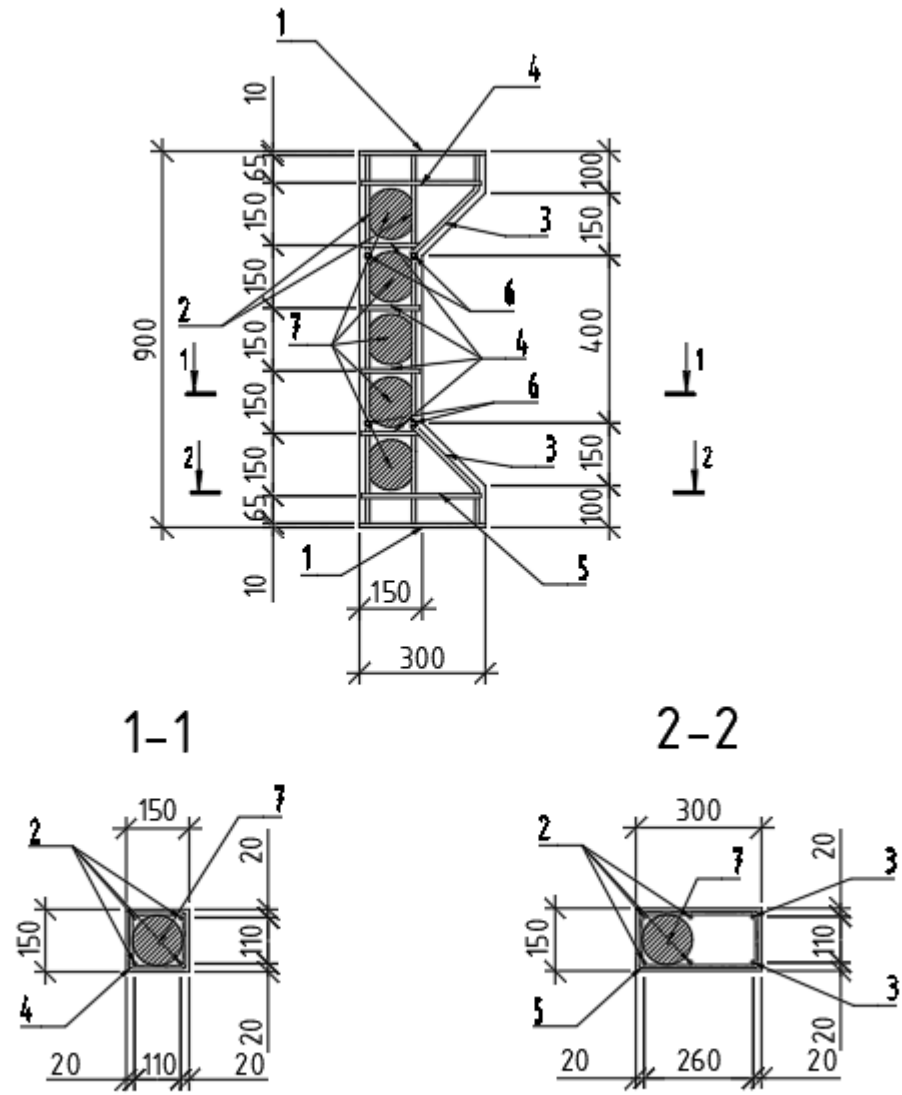


Рисунок 19 – Схема армирования колонны сплошного сечения

Таблица 4 – Спецификация материалов для армирования моделей колонн

Поз.	Наименование	Количество, шт.	Примечание
1	Металлическая пластина 150 × 300 × 10	2	Для усиления опорных частей
2	Ø10 A500 L = 880 мм	4	Продольная рабочая арматура
3	Ø10 A500 L = 320 мм	4	Продольная рабочая арматура
4	Ø10 A500 L = 500 мм	4	Поперечная рабочая арматура (хомут)
5	Ø10 A500 L = 750 мм	2	Поперечная рабочая арматура (хомут)
6	Переходная гайка М8	8	Для крепления приборов измерения
7	Сферические пустотообразователи из пенополистирола Ø = 120 мм	5	Для вытеснения бетона

Изготовление каркасов для образцов колонн производилось на производственном складе. Изготовленный арматурный каркас колонн сплошного сечения представлен на рисунке 20.

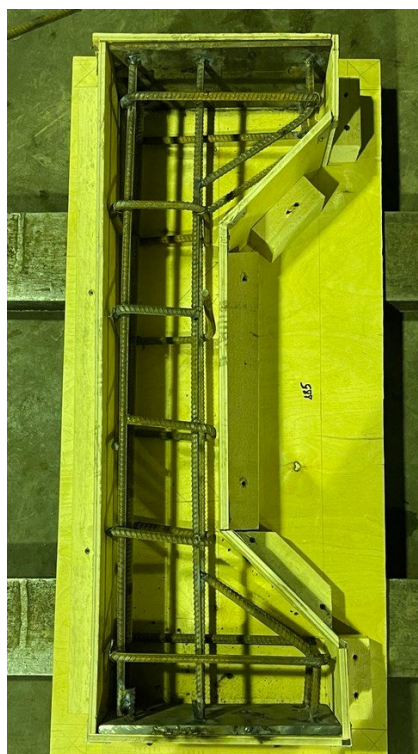


Рисунок 20 – Арматурный каркас колонны сплошного сечения

Процесс изготовления арматурного каркаса колонны со сферическими пустотообразователями усложняется тем, что диаметр шаров превосходит размер хомутов и расстояние между ними, из-за чего шары приходится устанавливать периодически с хомутами, после необходимо установить арматурный каркас в опалубку, приварить металлические пластины, расставить шары в проектное положение, закрепить хомуты и после шары. По этим причинам изготовление каркасов осуществляется методом вязки арматуры. Изготовленный арматурный каркас колонн с пустотообразователями представлен на рисунке 21.



Рисунок 21 – Арматурный каркас с пустотообразователями

4.4 Изготовление моделей железобетонных колонн для испытаний

После изготовления арматурных каркасов и деревянной опалубки, необходимо приступать к монолитным работам, а именно заливки бетонной смеси.

Перед заливкой бетонной смеси, стенки и дно опалубку необходимо обработать отработанным маслом, чтобы при снятии опалубки, железобетонные модели колонн не повредить.



Рисунок 22 – Обработанная опалубка

4.4.1 Изготовление бетонной смеси

После выполнения вышеперечисленных действий, необходимо изготовить бетонную смеси, класса прочности В15 [17]. Для этого необходимо определить объем бетонных моделей для того, чтобы рассчитать требуемые пропорции, количество материала и объем бетономешалки, так как бетонная смесь должна быть однородная и изготовлена одной партией [14].

Для изготовления бетонной смеси были приобретены цемент Марки 500, щебень строительный и песок строительный. За месяц до изготовления бетонной смеси все материалы были завезены на производственный склад и находились в нормальных условиях, чтобы избежать намокания и замораживания материала.

Для заливки шести моделей понадобится $0,16875 \text{ м}^3$ или 168,75 литров бетонной смеси. Для изготовления однородной и одной партии смеси необходима бетономешалка объемом 200 литров.

Бетонная смесь будет изготавливаться в следующей пропорции:

$$\text{Ц: П: Щ: В} = 2: 3,5: 6: 1$$

где

Ц – цемент;

П – песок;

Щ – щебень;

В – вода.

По факту во время изготовления бетонной смеси было затрачено:

- цемент – 80 кг;
- песок – 140 кг;
- щебень – 240 кг;
- вода – 40 кг.

А также для достижения пластичности и бетонная смесь удобно укладывалась в опалубку, был добавлен суперпластификатор Axton в объеме одного литра.

При укладке бетонной смеси в опалубки для достижения максимальной плотности, необходимо выполнить штыкование шпилькой во всех направлениях послойно.

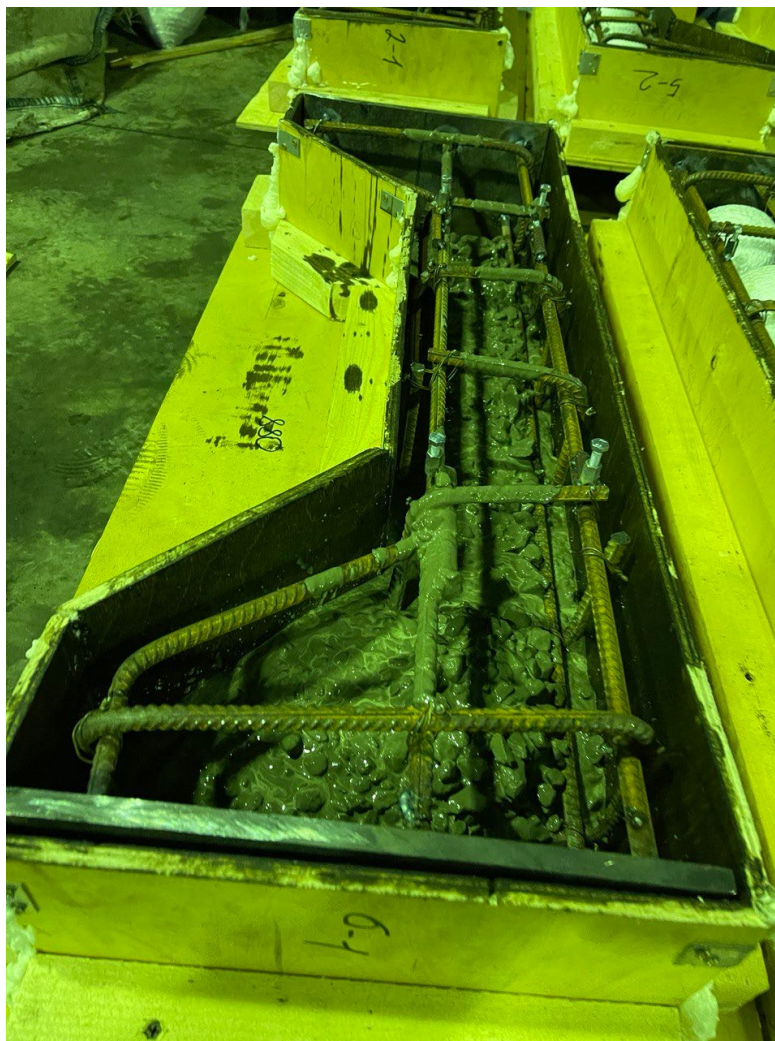


Рисунок 23 – Укладка бетонной смеси

После укладки бетонной смеси, были взяты пробы бетонной смеси и залиты в формы гранью десять сантиметров для определения кубиковой прочности бетона. Также необходимо накрыть модели колонн пленкой для предотвращения испарения влаги с поверхности бетона.



Рисунок 24 – Изолированные модели колонн

Железобетонные модели колонн были залиты 13 февраля 2024 года в 00:00. Фиксация времени необходима для планирования проведения экспериментальных исследований и точного определения класса бетона.

4.5 Подготовка испытываемых образцов и определение основных характеристик к проведению испытаний

После того, как было пройдено много этапов по изготовлению железобетонных моделей, необходимо качественно подготовить их к проведению экспериментальных исследований.

В первую очередь через неделю после заливки, модели колонн, необходимо распалубить и осмотреть поверхности на наличие дефектов.



Рисунок 25 – Модели колонн на седьмые сутки после заливки

После снятия опалубки можно сказать, что бетонные поверхности моделей колонн влажные, грани ровные, раковины и трещины отсутствуют.

После снятия опалубки необходимо покрасить бетонные поверхности в белый цвет в 2 слоя для того, чтобы во время проведения эксперимента, можно было четко разглядеть трещины на бетонной поверхности моделей.

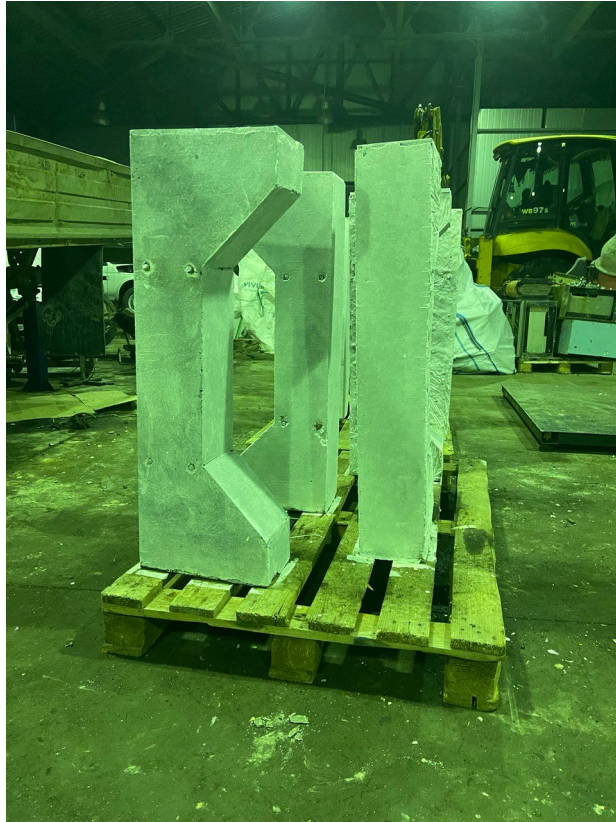


Рисунок 26 – Окрашенные модели колонн

После окраски колонн, на металлических листах в опорных частях колонн необходимо приварить пластины. Как ранее было описано, колонны изготавливались попарно. Первая пара – эксцентриситет равный 75 мм. Вторая пара – эксцентриситет равный 150 мм. Третья пара – эксцентриситет равный 212,5 мм. Различие только в том, что в парах одна колонна с пустотами, а другая эталонная, сплошного сечения.



Рисунок 27 – Готовые модели колонн

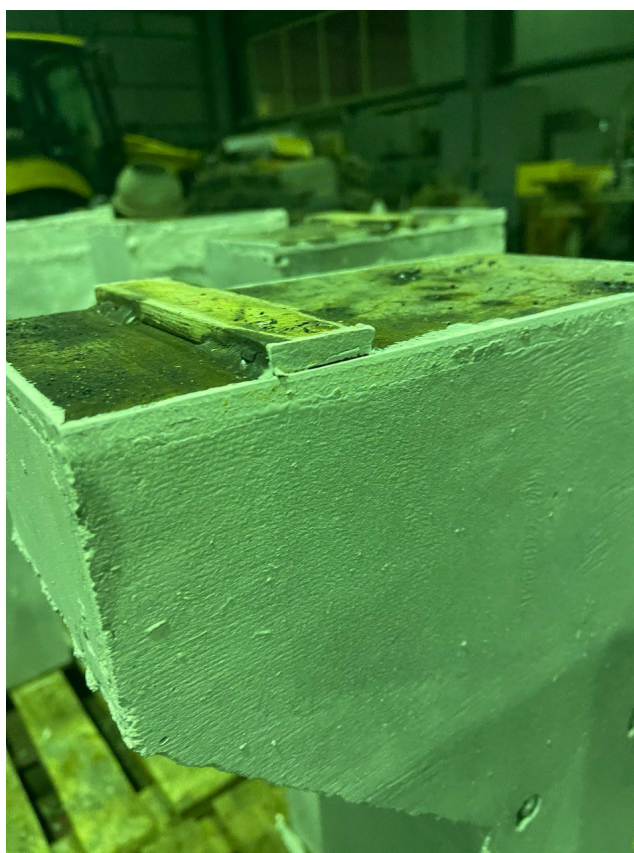


Рисунок 28 – Готова модель колонны с эксцентриситетом 150 мм

После изготовления моделей колонн на производственном складе, их необходимо транспортировать до лаборатории в ТГУ. Все колонны располагаются в лежачем положении на прицепе.

Колонны необходимо переносить в паре, в спецодежде и в перчатках для предотвращения травмирования участников проведения эксперимента.



Рисунок 29 – Модели колонн в лаборатории ТГУ

4.5.1 Определение фактической прочности бетона

Программа экспериментальных исследований включает в себя дополнительные мероприятия для того, чтобы добиться наиболее точного показателя результатов [7]. Этими дополнительными мероприятиями являются изготовление кубиков с гранями 10 см из бетонной смеси, который использовался для изготовления экспериментальных моделей колонн [3]. Данные бетонные кубики необходимы для определения фактического класса бетонной смеси и в дальнейшем корректировки расчетов прочности, деформативности и трещиностойкости по деформационной модели.

Испытания на сжатие контрольных образцов для установки прочности кубов производятся с помощью гидравлического пресса, описанного ранее. В рамках подготовки к проведению испытаний был изучен ГОСТ 24452-80 [23], правила эксплуатации пресса и приборов, инструкция по безопасности труда. Все испытания проводились в соответствии с ГОСТ 10180-2012 [16], ГОСТ 24452-80 [23].

Перед тем, как определять прочность бетонных кубиков, необходимо осмотреть все образцы на предмет наличия дефектов и по необходимости удалить все неровности [50]. После визуального обследования кубиков и убедившись в отсутствии дефектов, необходимо измерить все грани.

Во время установки кубиков на нижнюю платформу пресса, необходимо отцентрировать его по оси пресса. Для выравнивания опорных участков поверхностей образцов используется гипс, так как он является быстротвердеющей смесью [55]. Гипс наносится слоем не превышающий 5 мм. После установки образца, верхняя плита пресса вплотную совмещается с верхней плоскостью образца. Нагружение образцов происходит постепенно.

Прочность бетона на сжатие вычисляется с точностью до 0,1 МПа по следующей формуле:

$$R = \alpha \frac{F}{A}, \quad (1)$$

где, R – прочность бетона на сжатие, МПа;

α – масштабный коэффициент, приводящий найденную прочность бетона к прочности бетона базового размера;

F – разрушающая нагрузка, кг;

A – площадь рабочего сечения образца, м².

Таблица 5 – Результаты испытаний по определению прочности образцов-кубов на сжатие

Дата изготовления контрольного образца	Предполагаемый класс бетона, по прочности, МПа	Дата испытания контрольных образцов	Сутки после изготовления, сут.	Характеристика образца			Результаты испытания			Примечание
				Масса, г	Размеры, см	Средняя плотность, кг/м	Разрушающая нагрузка, кгс	Прочность образца, приведенная к базовому размеру, МПа	Средняя прочность образцов в серии, МПа	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
14.02.2024 00:30	B15	21.03.2024 18:00	35	-	10 × 10 × 10	-	17400	16,5	16,2	Прочность бетона в серии – среднеарифметическое значение прочности двух образцов с наибольшей прочностью

По результату испытания образцов-кубов значение средней прочности бетона равно $R = 16,2$ МПа, что соответствует классу бетона изделия B15.

4.5.2 Подготовка модели колонны к эксперименту

Испытываемую модель железобетонной колонны необходимо поставить на платформу прессы, перед этим убедиться, что платформа чистая, пятки колонн чистые. Колонны устанавливаются под контролем руководителя испытаний, пара студентов аккуратно устанавливает колонны и центрирует ее с помощью уровня и засечек на площадках прессы. После всего на переходные гайки, которые приварены к продольной (рабочей) арматуре, устанавливаются крепления для стержня и датчика часового типа, после на эти крепления устанавливаются сами приборы. Приборы проверяются на работоспособность, после выставляются необходимые значения. Таких приборов устанавливается 4 штуки, попарно на каждый вид арматуры. Также на бетонную поверхность устанавливаются тензодатчики Гугенбергера. Такие датчики устанавливаются по одному на каждую зону бетона (сжатая и растянутая). После этого колонна готова к проведению эксперимента. Все последующие действия подробно расписаны в третьей главе диссертации. Подобные действия необходимо повторять для каждой колонны.



Рисунок 30 – Подготовка колонны к эксперименту

Вывод по четвертой главе

В четвертой главе магистерской диссертации были прописаны мероприятия по изготовлению опалубки, арматурных каркасов, изготовлена бетонная смесь, подготовлены кубики для определения фактической прочности бетона. Описаны мероприятия по доставке опытных образцов до лаборатории института, мероприятия по подготовке образца к эксперименту.

Все опытные образцы были осмотрены на наличие дефектов, пронумерованы, окрашены. Также были изготовлены недостающие комплектующие измерительных приборов. Все колонны были подготовлены для проведения экспериментальных исследований.

Глава 5 Проведение экспериментов и обработка результатов

Для улучшения навигации по тексту выполним следующую маркировку испытываемых образцов:

- КС75 – колонна сплошного сечения при эксцентриситете 75 мм;
- КП75 – колонна с пустотами при эксцентриситете 75 мм;
- КС150 – колонна сплошного сечения при эксцентриситете 150 мм;
- КП150 – колонна с пустотами при эксцентриситете 150 мм;
- КС212,5 – колонна сплошного сечения при эксцентриситете 212,5 мм;
- КП212,5 – колонна с пустотами при эксцентриситете 212,5 мм.

5.1 Проведение экспериментальных испытаний

После изготовления моделей железобетонных колонн и подготовки их к испытанию были произведены испытания моделей колонн, а именно КС75, КП75, КС150, КП150, КС212,5 и КП212,5.

Проведение испытания образцов колонн производилось в присутствии научного руководителя и по правилам техники безопасности, прописанной во второй главе данной диссертации.

Испытание колонны сплошного сечения показаны на рисунке 28. Шаг нагружения колонны сплошного сечения при эксцентриситете равным 75 мм равен 1250 кг. Нагрузка повышалась каждые 3 минуты, в это время приводилась фиксация нагрузки, визуальное обследование поверхности колонны, фото и видео фиксация проведения эксперимента, запись в журнал проведения эксперимента всей необходимой информации для будущего анализа и контроль за измерительными приборами. На всем промежутке проведения эксперимента, до момента достижений предельных деформаций, при которых деформации продолжают расти без увеличения нагрузки, шаг и

время нагружения колонны были одинаковыми. На рисунке 31 представлено испытание модели колонны сплошного сечения при эксцентриситете 75 мм.



Рисунок 31 – Испытание колонны КС75

После момента появления первых трещин при визуальном осмотре поверхности моделей колонн, добавлялась еще одна операция, когда после каждого шага нагружения визуально фиксировались длина и ширина раскрытия трещин и места их появления. Момент появления трещин в колонне сплошного сечения при эксцентриситете равным 75 мм представлен на рисунке 32.



Рисунок 32 – Момент появления трещин в растянутой зоне в КС75

За разрушение испытываемой модели колонны при эксцентриситете равным 75 мм принималась величина деформации в арматуре равной $\varepsilon_s = 250 \times 10^{-5}$, данное значение деформации согласно СП 63.13330.2018 [41] указывает на то, что при достижении данного значения деформации элемент начинает разрушаться. Также важным для нас значением деформации согласно п.6.1.21 СП 63.13330.2018 [41] является $\varepsilon_{b1} = 150 \times 10^{-5}$, когда напряжения в бетоне перестают расти, начинается прирост деформации, в таком случае деформации в сжатой зоне прирастают еще больше при повышении нагрузки. Начало разрушения сжатой зоны колонны сплошного сечения при эксцентриситете равным 75 мм представлено на рисунке 33.



Рисунок 33 – Начало разрушения сжатой зоны колонны КС75

После достижения значения нагрузки, когда деформации начинают прирастать резко, без повышения нагрузки то в этом случае на прессе убавляется нагрузка и снимаются все измерительные приборы, чтобы при дальнейшем проведении эксперимента не повредить их. После снятия всех измерительных приборов, возвращаем нагрузку и постепенно повышаем ее до разрушения колонны. Разрушенная колонна сплошного сечения при эксцентриситете равным 75 мм представлена на рисунке 34.



Рисунок 34 – Разрушенная колонна КС75

После разрушения испытываемого элемента необходимо снизить нагрузку на прессе до нуля, при этом поддерживая модель колонны для предотвращения опрокидывания, так как видно на рисунке 31, колонна была сильно деформирована и фактически «сжата», и начальная длина элемента была уменьшена.

После демонтажа колонны с платформы прессы, производится уборка и подготовка следующего элемента к проведению эксперимента.

Следующей моделью над которой проводились экспериментальные исследования – колонна с пустотообразователями при эксцентриситете 75 мм. Ход проведения эксперимента идентичный и прописан в 3 главе данной диссертации. Далее будут фиксироваться только необходимые моменты.

На рисунке 35 представлен момент появления трещин в растянутой зоне колонны с пустотами при эксцентриситете 75 мм.



Рисунок 35 – Момент появления трещин в растянуто зоне колонны КП75

Также было замечено, что помимо растянутой зоны, трещины появлялись на боковых поверхностях колонны в центре сечения, что связано с ослаблением данной зоны из-за наличия пустот в теле железобетонного элемента. На рисунке 36 представлена момент образования такой трещины.



Рисунок 36 – Момент появления трещин в местах расположения пустотообразователей в колонне КП75

Начало разрушения колонны с пустотообразователями при эксцентриситете равным 75 мм было зафиксировано при меньшей нагрузке, но характер разрушения точно такой же, как у колонны сплошного сечения – хрупкий. Начало разрушения представлен на рисунке 37.

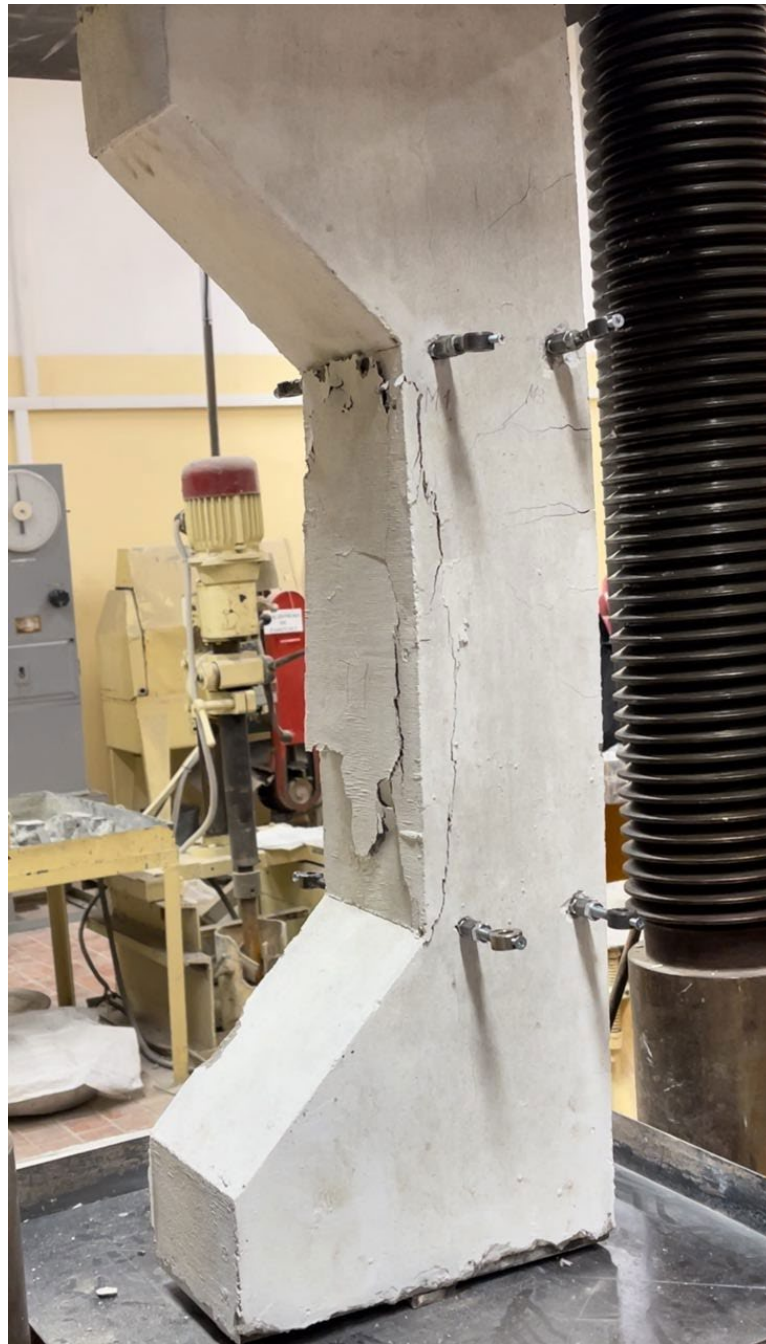


Рисунок 37 – Начало разрушения колонны КП75

Как и колонна сплошного сечения, в колонне с пустотобразователями при эксцентриситете 75 мм разрушение началось в сжатой зоне. Ход действий по разрушению колонны и последующему демонтажу, был описан ранее. Разрешенная колонна с пустотами при эксцентриситете равным 75 мм представлена на рисунке 38.



Рисунок 38 – Разрушенная колонна КП75

Последующие экспериментальные исследования, как и прежде проводятся согласно главе 3. Все действия во время проведения эксперимента такие же, поэтому последующее описание будет проводиться только по наиболее важным моментам эксперимента.

Момент образования трещин в колонне с пустотообразователями при эксцентриситете 150 мм показан на рисунке 39. В данном эксперименте первые трещины появились не в растянутой зоне, а по пустотам, но буквально сразу же трещины появились и в растянутой зоне.



Рисунок 39 – Момент образования трещин в колонне КП150

Характер разрушения колонны с пустотобразователями при эксцентриситете равном 150 мм, как было описано ранее приближен к «идеальному», так как разрушение пластическое и в след за растянутой зоной разрушается и сжатая. Момент начала разрушения колонны с пустотобразователями при эксцентриситете равном 150 мм представлен на рисунке 40.



Рисунок 40 – Момент разрушения колонны КП150

Разрушенная колонна с пустотобразователями при эксцентриситете равном 150 мм представлена на рисунке 41.



Рисунок 41 – Разрушенная колонна КР112,5

Момент образования трещин в колонне сплошного сечения практически такой же, как и в колонне с пустотообразователями. Отличительной чертой является лишь то, что трещины появились в растянутой зоне. Момент образования трещин в колонне сплошного сечения представлен на рисунке 42.

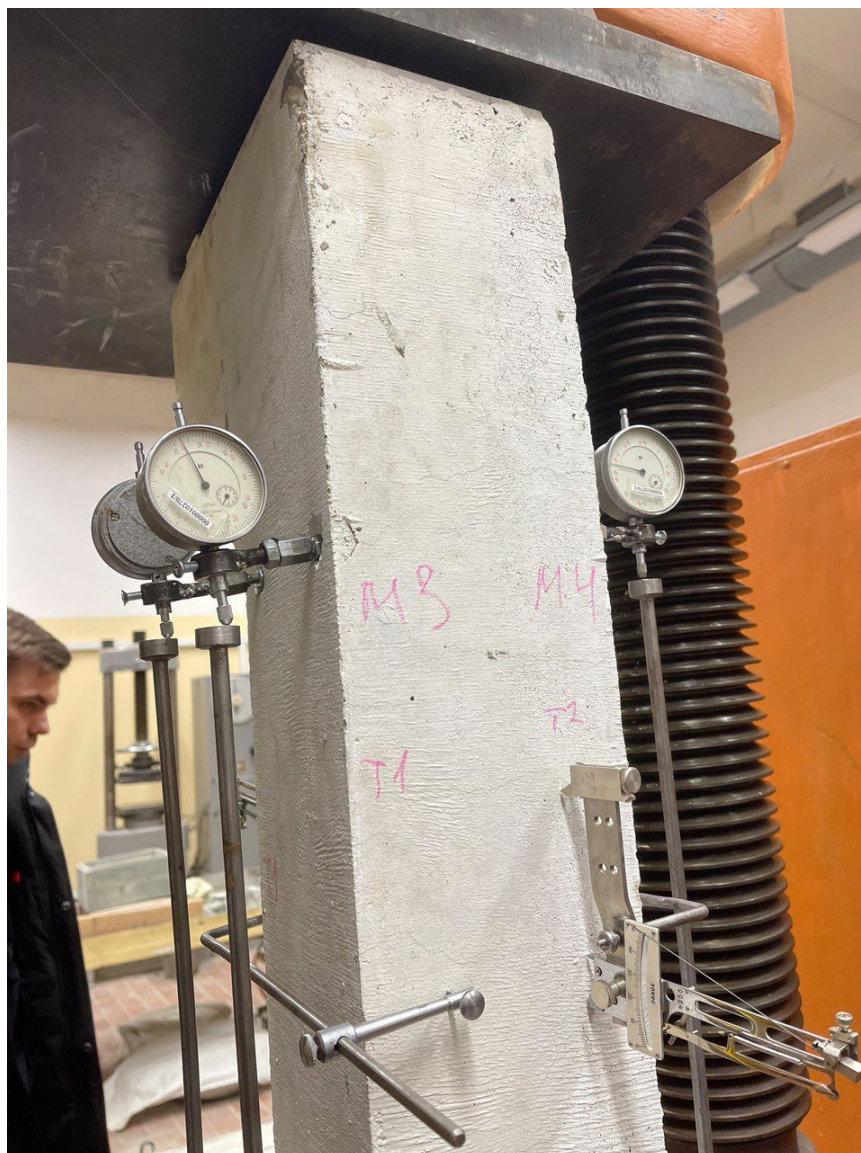


Рисунок 42 – Момент образования трещин в растянутой зоне колонны КС150

Характер разрушения колонны сплошного сечения при эксцентриситете равном 150 мм, точно такой же, как и у колонны с пустотами. Начало разрушения колонны сплошного сечения при эксцентриситете равном 150 мм представлено на рисунке 43.



Рисунок 43 – Начало разрушения колонны КС150

Разрушение колонны сплошного сечения точно, такое же, как и у колонны с пустотами – пластическое. За разрушение растянутой зоны моментально следует разрушение сжатой.

Разрушенная колонна сплошного сечения при эксцентриситете 150 мм представлено на рисунке 44.



Рисунок 44 – Разрушенная колонна КС150

Ход эксперимента над моделями колонн с эксцентриситетом рамным 212,5 мм был изменен, в связи с тем, что с увеличением эксцентриситета, вырастает момент. По отношению к колоннам с эксцентриситетом равным 75 мм, момент вырастает в 3 раза. Поэтому было принято решение, что нагружение будет осуществляться ступенями по 625 кг.

Трещины в колонне с пустотами при эксцентриситете равным 212,5 мм сначала появились в растянутой зоне, после протянулись до места расположения пустот.

Момент появления трещин в колонне с пустотообразователями при эксцентриситете 212,5 мм показан на рисунке 45.



Рисунок 45 – Момент появления трещин в колонне КП212,5

Начало разрушения как было выявлено ранее начался по растянутой зоне, но в моменте, при повышении нагрузки арматура, которая прикреплена к металлической пластине в опорной части отрывается. Начало разрушения колонны с пустотообразователями при эксцентриситете 212,5 мм представлено на рисунке 46.



Рисунок 46 – Начало разрушения колонны КП212,5

При разборке бетона в растянутой зоне в местах наибольшего разрушения зоны, был убран весь бетон для оценки разрушения. На рисунке 44 видно, что арматурный стержень оторван от пластины.



Рисунок 47 – Разрушенная колонна КП212,5

Заключительной колонной в эксперименте является колонна сплошного сечения с эксцентриситетом 212,5 мм. Также как и во всех случаях с колоннами сплошного сечения, трещины начали образовываться по растянутой зоне. Значения момента трещинообразования практически такое же, как и в колоннах с пустотами.



Рисунок 48 – Момент трещинообразования в колонне КС212,5

Также как и колонна с пустотами, колонна сплошного сечения при эксцентриситете 212,5 мм имеет пластический характер разрушения. Начало разрушения колонны представлен на рисунке 49. Растянутая арматура также оторвалась от металлической пластины.



Рисунок 49 – Начало разрушения колонны КС212,5

Во время проведения эксперимента моделей колонн, все фиксируемые значения деформаций, характер разрушения, выводы после визуального обследования заносились в протоколы испытаний для проведения анализа.

5.2 Анализ результатов испытаний

5.2.1 Теоретический расчет по предельным усилиям

Для определения несущей способности колонны сплошного сечения и колонны со сферическими пустотобразователями был выполнен расчет по прочности прямоугольных сечений внецентренно сжатых элементов согласно п. 8.1.14 СП 63.13330.2018 [41].

Расчет по предельным усилиям колонны сплошного сечения

Для колонны сплошного сечения необходимо выполнение условия 1.

$$N \cdot e \leq R_b \cdot b \cdot x \cdot (h_0 - 0,5) + R_{sc} \cdot A'_s \cdot (h_0 - a') \quad (1)$$

Определение высоты сжатой зоны:

При $\xi = \frac{x}{h_0} \leq \xi_R$

$$x = \frac{N + R_s \cdot A_s - R_{sc} \cdot A'_s}{R_b \cdot b} \quad (2)$$

При $\xi = \frac{x}{h_0} > \xi_R$

$$x = \frac{N + R_s \cdot A_s \cdot \frac{1 + \xi_R}{1 - \xi_R} - R_{sc} \cdot A'_s}{R_b \cdot b} \quad (3)$$

Определяем значение ξ_R .

$$\xi_R = \frac{x_R}{h_0} = \frac{0,8}{1 + \frac{\varepsilon_{s,el}}{\varepsilon_{b2}}} = \frac{0,8}{1 + \frac{0,0025}{0,0035}} = 0,46$$

$$\varepsilon_{s,el} = \frac{R_s}{E_s} = \frac{500}{200000} = 0,0025$$

Предварительно определяем высоту сжатой зоны по формуле 3, если условие $\xi = \frac{x}{h_0} \leq \xi_R$ выполняется, то принимает значение высоты сжатой зоны

по формуле 2, если значение не удовлетворяется, то определяем высоту сжатой зоны по формуле 3. Значение ξ для колонн сплошного сечения сводим в таблицу 6. Параллельно с расчетом высоты сжатой зоны, определяем предельные нагрузки по формуле 1 [36, 39].

Таблица 6 – Значения для колонн сплошного сечения

№ п/п	Маркировка колонны	e, мм	$\xi \leq \xi_R$			$\xi > \xi_R$		
			N, МПа * мм ²	ξ	x, мм	N, МПа * мм ²	ξ	x, мм
1	КС75	75	-	-	-	174 232,68	1,30	168,98
2	КС150	150	87 272,42	0,37	47,9	-	-	-
3	КС225	212,5	52 521,40	0,22	28,8	-	-	-

Расчет по предельным усилиям колонны с пустотами

Колонну с пустотообразователями будем считать двутавровым сечением.

Для колонны с пустотами необходимо выполнение условия 4.

$$N \cdot e \leq R_b b x (h_0 - 0,5x) + R_b A_{ov} (h_0 - 0,5h'_f) + (R_{sc} A'_s - 0,5N) \cdot (h_0 - a')$$
(4)

$$A_{ov} = (b'_f - b) \cdot h'_f = (150 - 42) \cdot 21 = 2268 \text{ мм}^2$$

Где высоту сжатой зоны принимаем равной:

$$\text{При } \xi = \frac{N - R_b A_{ov}}{R_b b h_0} \leq \xi_R; x = \xi h_0$$

$$x = \xi h_0$$
(5)

При $\xi > \xi_R$;

$$x = h_0 \frac{(\alpha_n - \alpha_{ov})(1 - \xi_R) + 2\alpha_s \xi_R}{1 - \xi_R + 2\alpha_s}$$
(6)

$$\text{Где } \alpha_s = \frac{R_s A_s}{R_b b h_0}; \alpha_n = \frac{N}{R_b b h_0}; \alpha_{ov} = \frac{A_{ov}}{b h_0}$$

Таблица 7 – Значения для колонн с пустотами

№ п/п	Маркировка колонны	e, мм	$\xi \leq \xi_R$			$\xi > \xi_R$		
			N, МПа * мм ²	ξ	x, мм	N, МПа * мм ²	ξ	x, мм
1	КС75	75	-	-	-	82 606,66	0,83	68,73
2	КС150	150	57 469,64	0,45	58,88	-	-	-
3	КС225	212,5	39 973,57	0,19	24,33	-	-	-

В таблице 6 и 7 представлены значения, которые в последующем будут использоваться для определения деформаций по деформационной модели при значении предельной нагрузки, определенной с помощью расчета по предельным усилиям, также будут определены значения предельных нагрузок с помощью деформационной модели и в последующем сравниваться с расчетными значениями деформационной модели и расчетом по предельным усилиям, а также с экспериментальными значениями [47].

5.2.2 Теоретический расчет по деформационной модели

При проведении расчета с помощью деформационной модели, разрушением будет являться значения относительных деформаций, достигнутых в сжатой зоне бетона при $\varepsilon_b = 350 \times 10^{-5}$ и/или в арматуре сжатой или растянутой при $\varepsilon_s = 250 \times 10^{-5}$. Данные значения являются предельными, при достижении таких значений фиксируется рост относительной деформации без повышения нагрузки [48].

Теоретические значения, определенные с помощью деформационной модели представлены в таблицах 9, 10, 11, 12, 13 и 14.

Также одним из сравнительных значений выступает момент образования трещин [45]. Для каждой из проектируемых моделей выполнен теоретический расчет момента образования трещин с помощью деформационной модели. Все значения сводятся в таблицу 8.

Таблица 8 – Сравнение теоретического момента образования трещин

Вид колонны	Нагрузка, кг	%
1	2	3
КС75	2 372,00	100,00
КП75	2 643,00	111,42
КС150	846,00	100,00
КП150	762,00	90,07
КС212,5	551,00	100,00
КП212,5	478,00	86,75

При сравнении расчетных значений, можно сказать, что:

- введение пустотообразователей в тело бетона при эксцентриситете 75 мм позволяет увеличить предельную нагрузку момента образования трещин на 11,42%;
- при больших значениях величины эксцентриситета, предельная нагрузка по моменту образования трещин уменьшается в колоннах с пустотами, так при эксцентриситете 150 мм, разница составляет 10%, а при 212,5 мм 13,25 %.

5.2.3 Сравнение полученных результатов испытания моделей колонн и значений теоретических расчетов

Все испытываемые образцы колонн в ходе испытания были доведены до разрушения при достижении деформаций продольной рабочей арматуры 250×10^5 . Показатели предельных значений колонн были различными и от значения эксцентриситета менялись в следующем порядке [49].

При эксцентриситете равным 75 мм, в колонне сплошного сечения, когда продольная ось приложения нагрузки проходила по ребру сечения колонны, разрушение при проведении эксперимента было зафиксировано в сжатой арматуре, так же по деформационной модели было определено, что разрушение начинается сжатой арматуры. Точно такая же ситуация складывается с пустотной колонной.

При эксцентриситете равном 150 мм, в колонне сплошного сечения разрушение при проведении эксперимента было зафиксировано в растянутой арматуре, так же по деформационной модели было определено, что разрушение начинается с растянутой арматуры. Но уже при введении пустотообразователей в тело колонны, разрушение при проведении эксперимента также фиксируется по растянутой арматуре, но по деформационной модели было определено разрушение по сжатой арматуре.

В образцах железобетонных монолитных колоннах если сравнить момент трещинообразования, то при одинаковом эксцентриситете, но при разном сечении явно выявленных момент не было обнаружено, только было зафиксировано, что на колоннах с пустотообразователями трещины образовывались по пустотам.

При эксцентриситете равном 212,5 мм в колоннах сплошного сечения и с пустотами, и по эксперименту, и по деформационной модели разрушение начинается с растянутой арматуры.

Данные для сравнения результатов испытаний и показателей теоретических расчетов с помощью деформационной модели приведены в сводных таблицах: 9, 10, 11, 12, 13 и 14.

Таблица 9 – Сравнение показателей относительных деформаций эксперимента и деформационной модели колонны КС75

№ п/п	Нагрузка, кг	Сжатая зона бетона		Растянутая зона бетона		Сжатая арматура		Растянутая арматура	
		Расчётная $\varepsilon_b \times 10^5$	Эксперимент. $\varepsilon_b \times 10^5$	Расчётная $\varepsilon_b \times 10^5$	Эксперимент. $\varepsilon_b \times 10^5$	Расчётная $\varepsilon_s \times 10^5$	Эксперимент. $\varepsilon_s \times 10^5$	Расчётная $\varepsilon_s \times 10^5$	Эксперимент. $\varepsilon_s \times 10^5$
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	1 250	-17	-7	7	7	-15	-12,5	5	11,25
2	2 500	-36	-16	14	14	-31	-30	14	22,5
3	3 750	-55	-36	34	17	-47	-50	26	31,25
4	5 000	-74	-61	50	40	-63	-72,5	38	45
5	6 250	-93	-77	63	59	-79	-92,5	48	52,5
6	7 500	-112	-98	76	85	-94	-112,5	58	62,5
7	8 750	-131	-115	92	113	-110	-135	71	68,5
8	10 000	-149	-133	105	137	-126	-152,5	81	77,5
9	11 250	-174	-156	121	166	-146	-172,5	94	85
10	12 500	-203	-175	140	189	-171	-190	108	95
11	13 750	-235	-	159	-	-198	-212,5	123	106,25
12	15 000	-273	-	180	-	-231	-230	139	122,5
13	15 714	-295	-	192	-	-250	-248	147	128,935

Таблица 10 – Сравнение показателей относительных деформаций эксперимента и деформационной модели колонны КП75

№ п/п	Нагрузка, кг	Сжатая зона бетона		Растянутая зона бетона		Сжатая арматура		Растянутая арматура	
		Расчётная $\varepsilon_b \times 10^5$	Эксперимент. $\varepsilon_b \times 10^5$	Расчётная $\varepsilon_b \times 10^5$	Эксперимент. $\varepsilon_b \times 10^5$	Расчётная $\varepsilon_s \times 10^5$	Эксперимент. $\varepsilon_s \times 10^5$	Расчётная $\varepsilon_s \times 10^5$	Эксперимент. $\varepsilon_s \times 10^5$
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	1 250	-22	-2	6	11	-20	-2,5	3	1,25
2	2 500	-45	-5	14	31	-40	-12,5	9	12,5
3	3 750	-70	-15	31	46	-60	-25	22	22,5
4	5 000	-93	-22	42	64	-80	-32,5	30	32,5
5	6 250	-116	-29	54	77	-100	-37,5	39	38,75
6	7 500	-139	-	65	78	-120	-57,5	46	55
7	8 750	-168	-	78	-	-145	-67,5	55	65
8	10 000	-208	-	94	-	-180	-82,5	66	76,25
9	11 250	-255	-	111	-	-221	-97,5	77	90
10	12 117	-288	-	123	-	-250	-109,6	85	101,3

Таблица 11 – Сравнение показателей относительных деформаций эксперимента и деформационной модели колонны КС150

№ п/п	Нагрузка, кг	Сжатая зона бетона		Растянутая зона бетона		Сжатая арматура		Растянутая арматура	
		Расчётная $\varepsilon_b \times 10^5$	Эксперимент. $\varepsilon_b \times 10^5$	Расчётная $\varepsilon_b \times 10^5$	Эксперимент. $\varepsilon_b \times 10^5$	Расчётная $\varepsilon_s \times 10^5$	Эксперимент. $\varepsilon_s \times 10^5$	Расчётная $\varepsilon_s \times 10^5$	Эксперимент. $\varepsilon_s \times 10^5$
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	1 250	-34	-3	38	1	-27	-7,5	31	5
2	2 500	-67	-23	85	43	-53	-50	71	55
3	3 750	-101	-63	127	123	-80	-87,5	106	117,5
4	5 000	-135	-83	170	-	-106	-112,5	142	142,5
5	6 250	-174	-118	216	-	-138	-137,5	180	200
6	7 500	-225	-156	302	-	-179	-162,5	221	242,5
7	8 339	-264	-	302	-	-211	-211	250	247
8	8 422	-	-	-	-	-	-	-	250
9	8 750	-264	-	-	-	-	-235	-	280

Таблица 12 – Сравнение показателей относительных деформаций эксперимента и деформационной модели колонны КП150

№ п/п	Нагрузка, кг	Сжатая зона бетона		Растянутая зона бетона		Сжатая арматура		Растянутая арматура	
		Расчётная $\varepsilon_b \times 10^5$	Эксперимент. $\varepsilon_b \times 10^5$	Расчётная $\varepsilon_b \times 10^5$	Эксперимент. $\varepsilon_b \times 10^5$	Расчётная $\varepsilon_s \times 10^5$	Эксперимент. $\varepsilon_s \times 10^5$	Расчётная $\varepsilon_s \times 10^5$	Эксперимент. $\varepsilon_s \times 10^5$
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	1 250	-40	-1	40	0	-32	0	32	2,5
2	2 500	-79	-26	81	34	-64	-30	67	57,5
3	3 750	-118	-59	123	92	-96	-52,5	101	122,5
4	5 000	-162	-82	165	127	-131	-65	135	170
5	6 250	-226	-111	214	163	-185	-85	173	217,5
6	7 153	-	-	-	-	-	-	-	250
7	7 486	-302	-	262	-	-250	-112,5	210	262
8	7 500	-	-	-	-	-	-112,5	-	262,5
9	8 750	-	-	-	-	-	-117,5	-	317,5

Таблица 13 – Сравнение показателей относительных деформаций эксперимента и деформационной модели колонны КС212,5

№ п/п	Нагрузка, кг	Сжатая зона бетона		Растянутая зона бетона		Сжатая арматура		Растянутая арматура	
		Расчётная $\varepsilon_b \times 10^5$	Эксперимент. $\varepsilon_b \times 10^5$	Расчётная $\varepsilon_b \times 10^5$	Эксперимент. $\varepsilon_b \times 10^5$	Расчётная $\varepsilon_s \times 10^5$	Эксперимент. $\varepsilon_s \times 10^5$	Расчётная $\varepsilon_s \times 10^5$	Эксперимент. $\varepsilon_s \times 10^5$
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	625	-23	-2	25	2	-18	-2,5	21	0
2	1 250	-46	-21	67	44	-36	-20	57	40
3	1 875	-69	-45	101	52	-54	-35	85	57,5
4	2 500	-92	-61	135	93	-71	-50	114	85
5	3 125	-115	-91	169	157	-89	-50	142	135
6	3 750	-138	-116	2-3	-	-106	-62,5	171	167,5
7	4 375	-165	-140	239	-	-127	-77,5	201	200
8	5 000	-196	-	277	-	-152	-90	233	230
9	5 333	-214	-	297	-	-167	-	250	-
10	5 385	-	-	-	-	-	-	-	250
11	5 625	-	-	-	-	-	-102,5	-	262,5

Таблица 14 – Сравнение показателей относительных деформаций эксперимента и деформационной модели колонны КП150

№ п/п	Нагрузка, кг	Сжатая зона бетона		Растянутая зона бетона		Сжатая арматура		Растянутая арматура	
		Расчётная $\varepsilon_b \times 10^5$	Эксперимент. $\varepsilon_b \times 10^5$	Расчётная $\varepsilon_b \times 10^5$	Эксперимент. $\varepsilon_b \times 10^5$	Расчётная $\varepsilon_s \times 10^5$	Эксперимент. $\varepsilon_s \times 10^5$	Расчётная $\varepsilon_s \times 10^5$	Эксперимент. $\varepsilon_s \times 10^5$
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	625	-27	-9	32	2	-21	-7,5	26	10
2	1 250	-53	-16	66	14	-42	-17,5	55	20
3	1 875	-79	-33	100	42	-63	-47,5	83	77,5
4	2 500	-106	-43	133	54	-84	-60	111	110
5	3 125	-132	-58	166	74	-105	-75	138	140
6	3 750	-163	-75	201	97	-129	-97,5	167	217,5
7	4 375	-203	-85	238	-	-162	-110	197	245
8	4 479	-	-	-	-	-	-	-	250
9	5 000	-251	-96	277	-	-202	-125	228	275
10	5 442	-286	-	305	-	-231	-	250	-
11	5 625	-	-	-	-	-	-140	-	307,5

Для наглядности, относительные деформации, снятые по индикаторам часового типа, были перенесены в таблицы 9, 10, 11, 12, 13, 14 с увеличением в 10^5 раз.

При анализе полученных значений относительных деформаций, зафиксированных при проведении эксперимента, в сравнительные таблицы были внесены наиболее корректные значения, так как значения измерительных приборов отличались и явным показателем было сравнение с деформационной моделью.

В КС75, разрушение было зафиксировано в сжатой арматуре при нагрузке равной 16 041,67 кг. В КП75, разрушение было зафиксировано в сжатой арматуре при нагрузке равной 15 000,00 кг. В КС150 разрушение было зафиксировано в растянутой арматуре при нагрузке равной 8 421,52 кг. В КП150 разрушение было зафиксировано в растянутой арматуре при нагрузке равной 7 152,78 кг. В КС212,5 разрушение было зафиксировано в растянутой арматуре при нагрузке равной 5 385,00 кг. В КП212,5 разрушение было зафиксировано в растянутой арматуре при нагрузке равной 4 479,00 кг.

Данные значения нагрузок соответствует относительной деформации продольной арматуры 250×10^5 .

Проанализировав полученные значения при проведении эксперимента, а также при расчете по деформационной модели, были составлены линейные диаграммы с зависимостями относительных деформаций от приложенной нагрузки и сопоставлены с расчётными значениями деформационной модели и представлены на рисунках 50, 51, 52, 53, 54 и 55.

Для лучшей навигации на диаграммах принимаем, следующие иллюстрации: синий квадрат – колонна сплошного сечения экспериментальные значения; оранжевый круг – колонна пустотная экспериментальные значения; сплошная зеленая линия – сплошная колонна теоретические значения; пунктирная желтая – пустотная колонна теоретические значения.

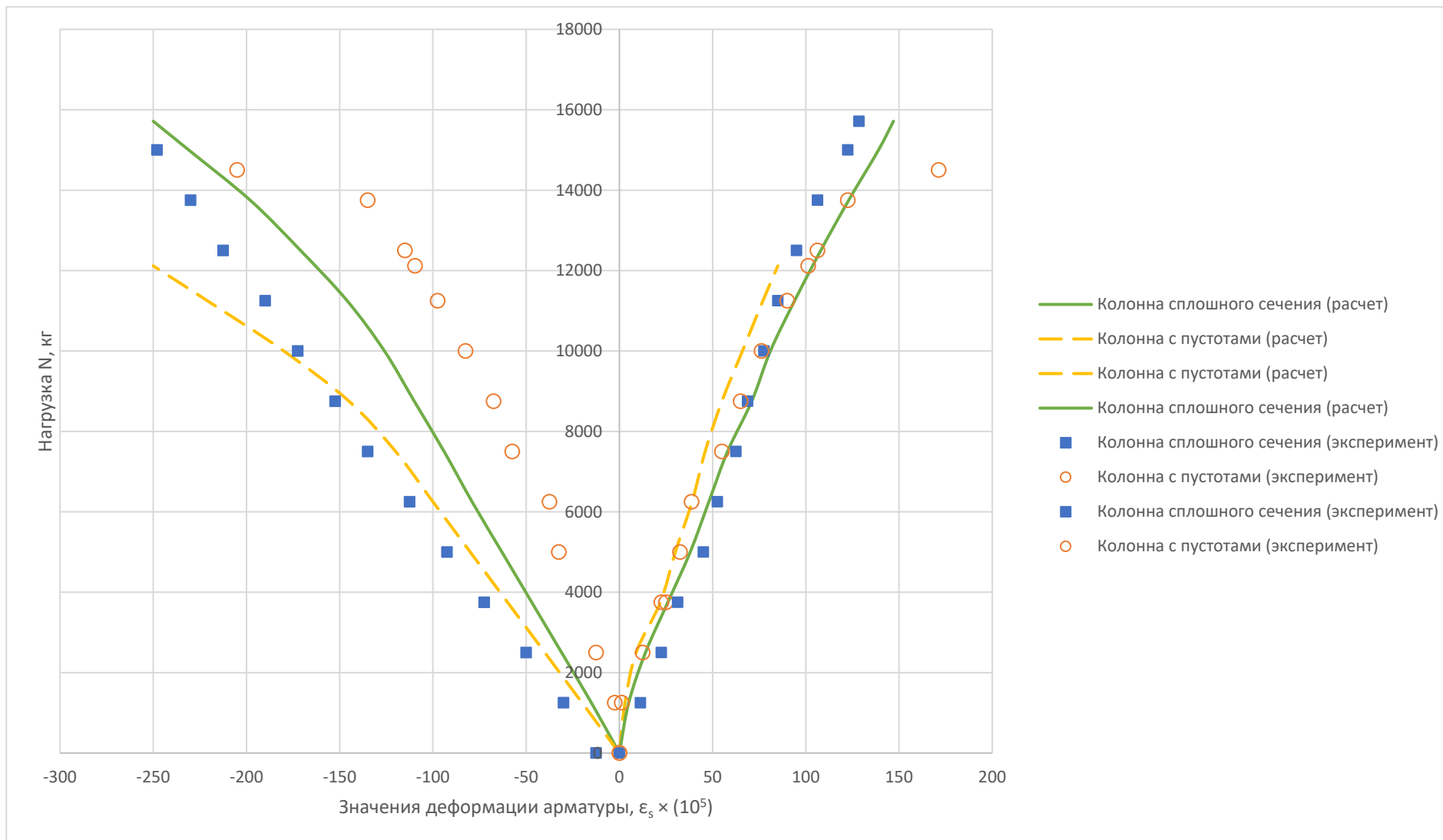


Рисунок 50 – Значения относительной деформации арматуры КС75 и КП75 в зависимости от нагрузки

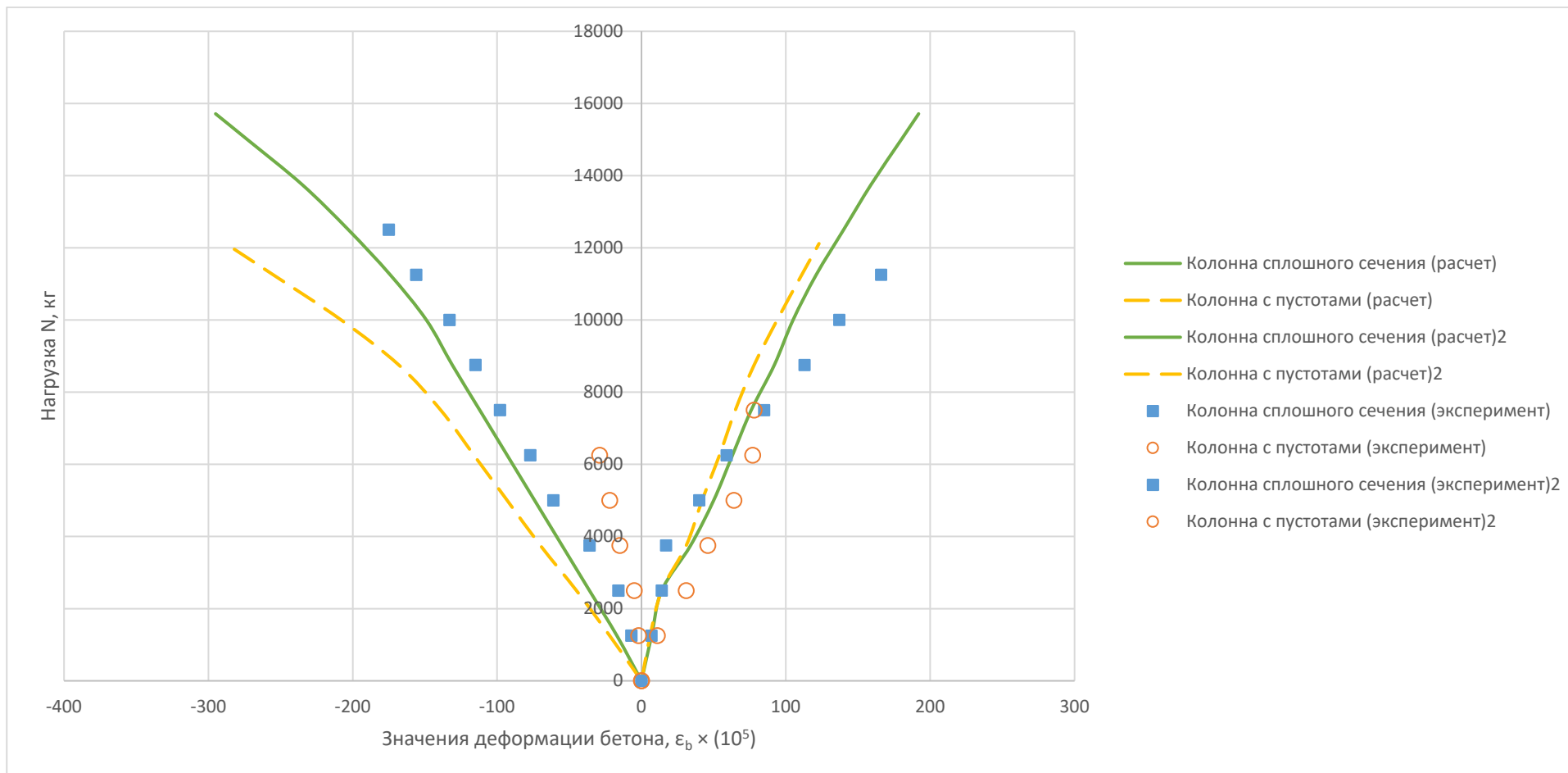


Рисунок 51 – Значения относительной деформации в крайних волокнах бетона КС75 и КП75 в зависимости от нагрузки

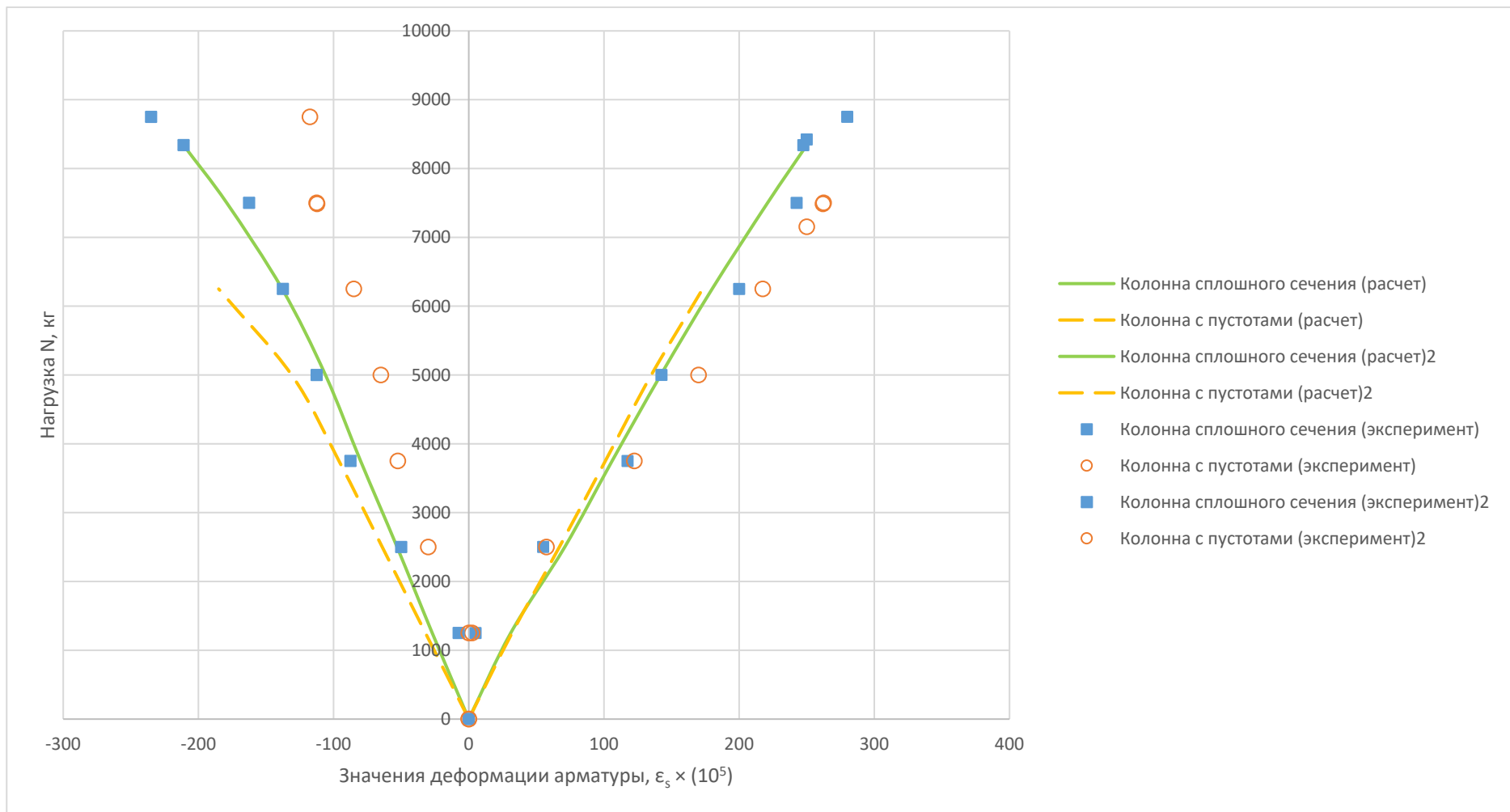


Рисунок 52 – Значения относительной деформаций арматуры КС150 и КП150 в зависимости от нагрузки

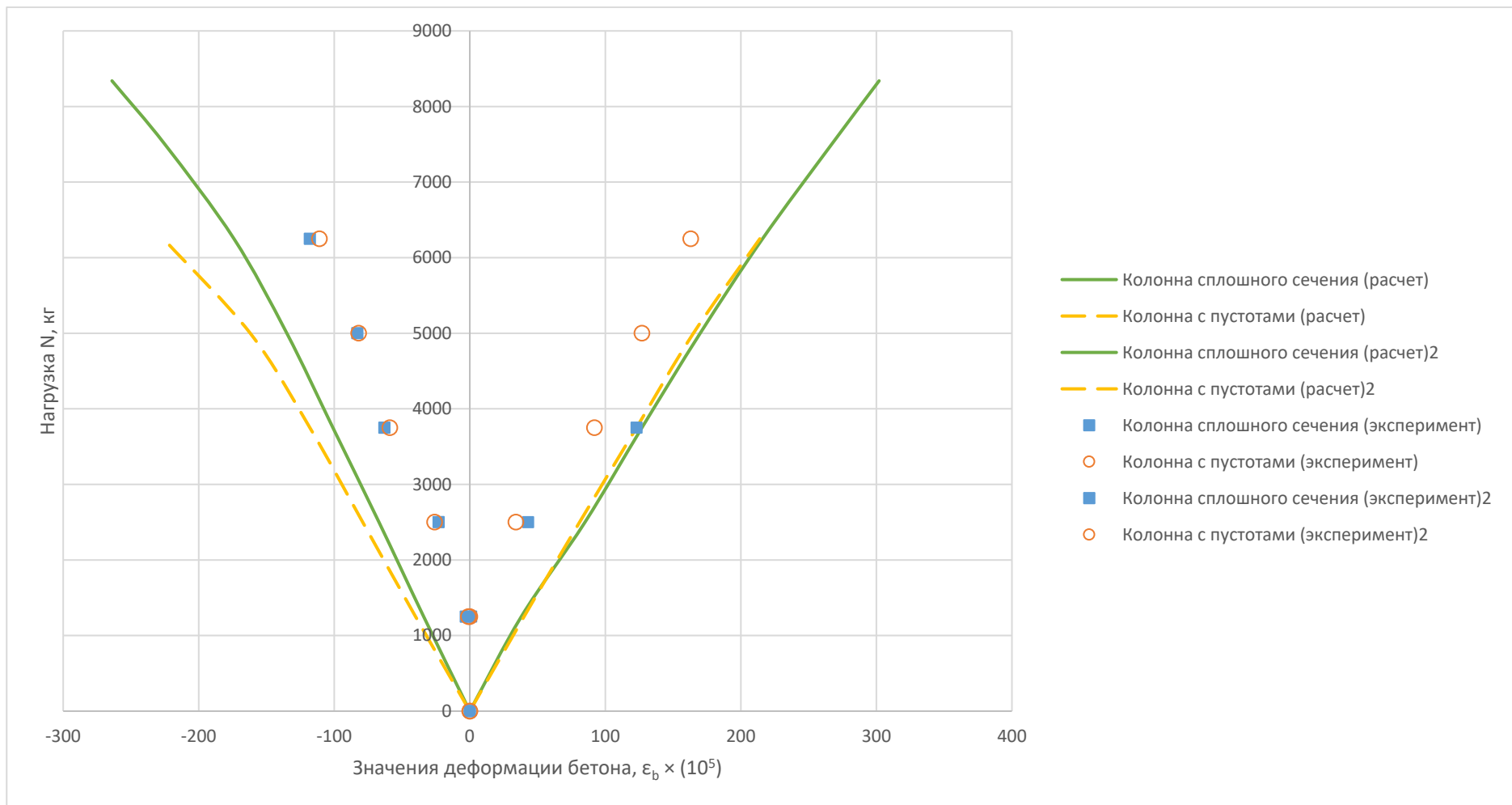


Рисунок 53 – Значения относительных деформаций в крайних волокнах бетона КС150 и КП150 в зависимости от нагрузки

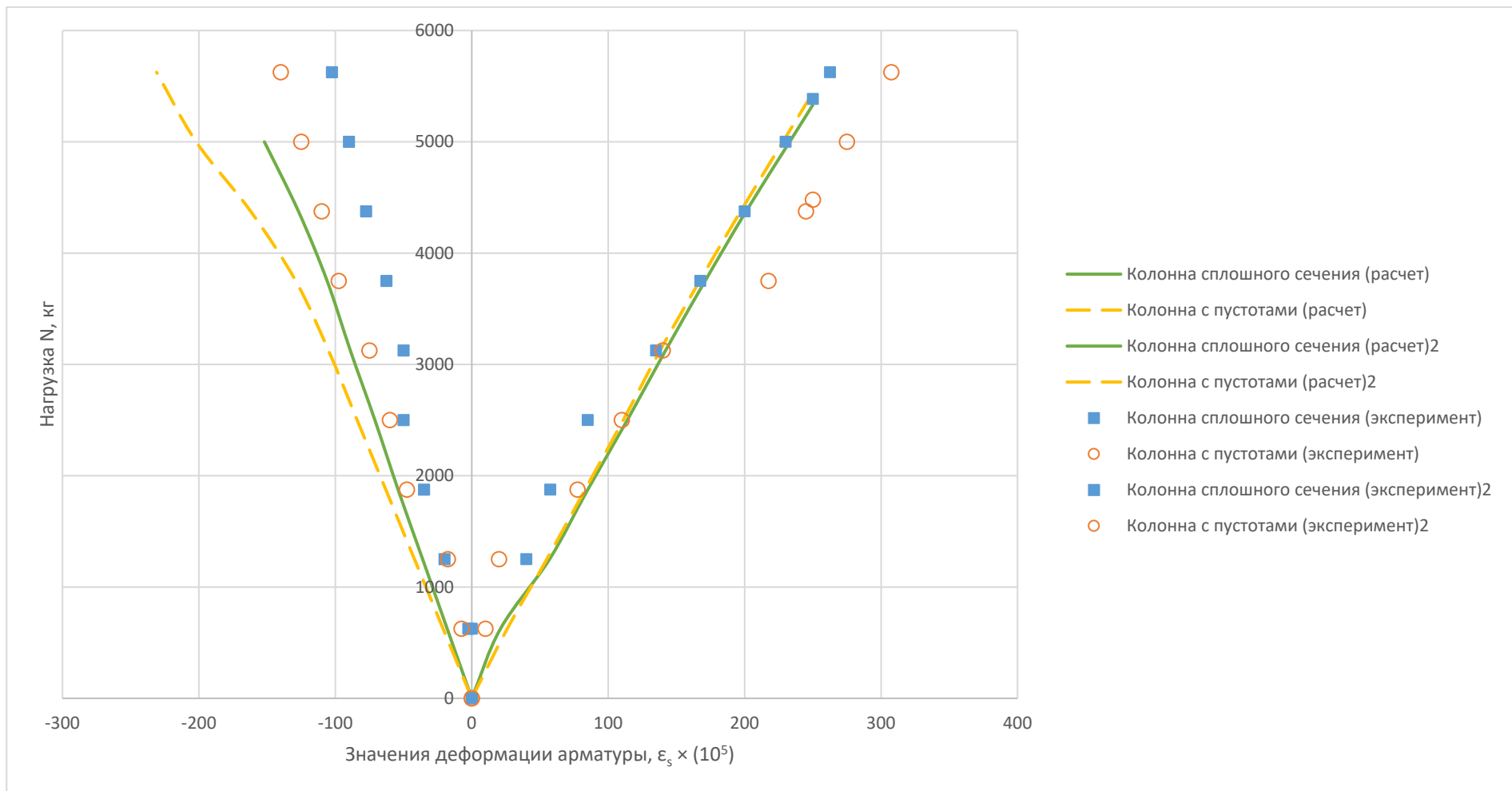


Рисунок 54 – Значения относительных деформаций арматуры КС212,5 и КП212,5 в зависимости от нагрузки

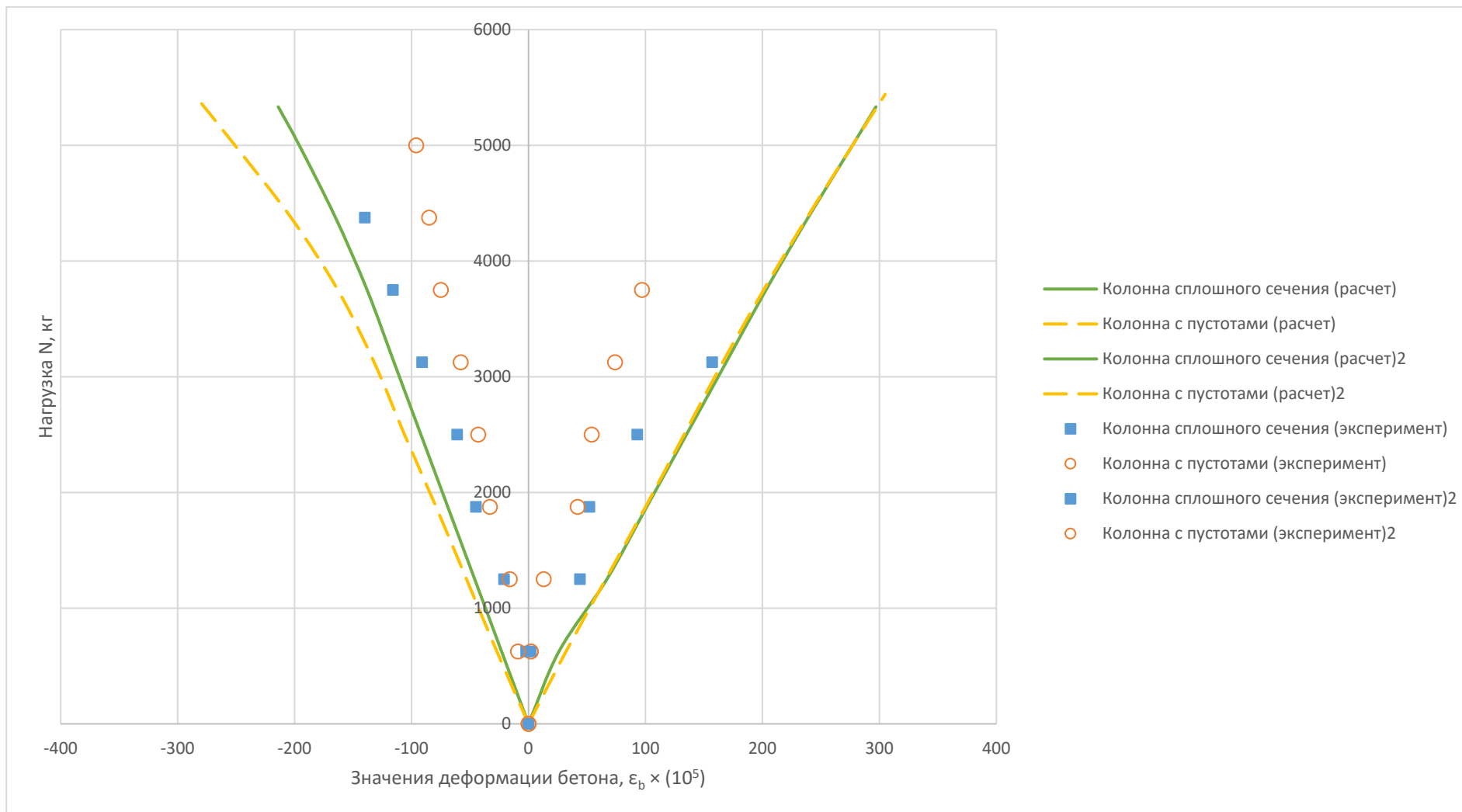


Рисунок 55 – Значения относительных деформаций в крайних волокнах бетона КС212,5 и КП212,5 в зависимости от нагрузки

При рассмотрении диаграмм зависимости деформаций арматуры и бетона от приложенной нагрузки для наглядности сравнения полученных результатов значений эксперимента и теоретических расчетов были сведены в таблицы 15, 16, 17, 18, 19, 20.

Таблица 15 – Сравнение предельных значений при эксцентриситете 75 мм

Вид колонны	Деформационная модель		Расчет по предельным усилиям		Эксперимент	
	Нагрузка, кг	%	Нагрузка, кг	%	Нагрузка, кг	%
1	2	3	4	5	6	7
КС75	15 714,10	100,00	17 423,27	100,00	16 041,67	100,00
КП75	12 116,70	77,11	8 260,67	47,41	15 000,00	93,51

Таблица 16 – Сравнение предельных значений при эксцентриситете 150 мм

Вид колонны	Деформационная модель		Расчет по предельным усилиям		Эксперимент	
	Нагрузка, кг	%	Нагрузка, кг	%	Нагрузка, кг	%
1	2	3	4	5	6	7
КС150	8 339,40	100,00	8 727,00	100,00	8 421,52	100,00
КП150	7 486,20	89,77	5 747,00	65,85	7 152,78	84,93

Таблица 17 – Сравнение предельных значений при эксцентриситете 212,5 мм

Вид колонны	Деформационная модель		Расчет по предельным усилиям		Эксперимент	
	Нагрузка, кг	%	Нагрузка, кг	%	Нагрузка, кг	%
1	2	3	4	5	6	7
КС212,5	5 333,00	98,00	5 252,00	100,00	5 385,00	100,00
КП212,5	5 442,00	100,00	3 997,00	76,10	4 479,00	83,18

В результате сравнения данных по таблицам 1, 2, 3 можно сказать, что:

- при введении пустотообразователей в тело железобетонной колонны теоретически несущая способность при увеличении эксцентриситета

становится равной эталонному сечению, поэтому эффективность использования пустот достигается при больших значениях эксцентриситета;

- наиболее точным расчетом определения несущей способности железобетонных колонн сплошного сечения и с пустотами является деформационная модель, разница от экспериментальных значений составляет для эксцентриситета 75 мм – 19,2%, что может говорить о запасе несущей способности, для эксцентриситета 150 мм – 4,5 %, для эксцентриситета 212,5 мм – 18,7 %, при приложении нагрузки за грань сечения колонны, запас прочности становится отрицательным;
- теоретические значения, определенные деформационной моделью для колонн сплошного сечения, имеют отклонение от экспериментальных значений в среднем на 1,4%.

Таблица 18 – Сравнение данных испытания балок при эксцентриситете 75 мм

Вид колонны	Нагрузка, кг	Деформации арматуры, $\epsilon_s \times 10^5$	
		Без размерности	%
1	2	3	4
КС75	10000	77,5	101,64
КП75		76,25	100,00

Таблица 19 – Сравнение данных испытания балок при эксцентриситете 150 мм

Вид колонны	Нагрузка, кг	Деформации арматуры, $\epsilon_s \times 10^5$	
		Без размерности	%
1	2	3	4
КС150	6250	200	100,00
КП150		217,5	108,75

Таблица 20 – Сравнение данных испытания балок при эксцентриситете 212,5 мм

Вид колонны	Нагрузка, кг	Деформации арматуры, $\epsilon_s \times 10^5$	
		Без размерности	%
1	2	3	4
КС212,5	3125	135	100,00
КП212,5		140	103,70

При сравнении относительных деформаций, полученных при испытании, можно сделать следующие выводы:

- для балки со сферическими образателями при эксцентриситете 150 мм при нагрузке 6 250 кг разница зафиксированных значений относительной деформации в растянутой арматуре составляет 8,75%;
- для балки со сферическими образателями при эксцентриситете 212,5 мм при нагрузке 3 125 кг разница зафиксированных значений относительной деформации в растянутой арматуре составляет 3,70%
- при увеличении величины эксцентриситета уменьшается разница относительных деформаций;
- для моделей колонн при эксцентриситете равном 75 мм, когда продольная ось нагрузки проходит по сжатой грани элемента, разница деформаций при нагрузке в 10 000 кг составляет 1,64%.

Рекомендации по применению пустотообразователей во внецентренно сжатых железобетонных элементах

Данное решение применительно для монолитных колонн, например в высотных жилых зданиях. Оно позволит снизить общий вес колонн, как следствие, уменьшить нагрузку на нижележащие конструкции, а также позволит унифицировать размер сечения колонн по всей высоте здания за счет введения пустотообразователей, вследствие позволит снизить затраты на закупку материалов для изготовления опалубки или ее аренду, место на складирование на строительной площадке, а также затраты на ее обслуживание. Снижение доли бетона в конструкции здания позволит снизить выбросы CO₂ при производстве цемента, а также снизить использование не возобновляемых ресурсов.

Выводы по пятой главе.

По итогам проделанной работы в третьей и четвертой главах магистерской диссертации были выполнены следующие задачи:

- проведены испытания 6 моделей колонн;
- предложена рекомендация по применению внецентренно сжатых железобетонных пустотных элементов;
- теоретическим расчетом было определено, что введение пустотообразователей приводит к снижению предельной нагрузки момента трещинообразования, при сравнении КС75 и КП75, колонна с пустотами имела запас 11,42%, в колоннах КС150 и КП150 пустотная колонна имеет значение момента образования трещин меньше на 9,93%, при эксцентриситете 212,5мм – 13,25%;
- теоретические значения, определенные деформационной моделью для колонн сплошного сечения, имеют отклонение от экспериментальных значений в среднем на 1,4%.
- при увеличении величины эксцентриситета уменьшается разница относительных деформаций.

Заключение

По ходу выполнения магистерской диссертации были выполнены поставленные задачи, сделаны следующие выводы:

- разработана конструкция облегченного внецентренно сжатого железобетонного элемента со сферическими несъемными пустотообразователями;
- введение пустотообразователей в теле модели железобетонной колонны повлекло за собой уменьшение массы элемента на 22,33%, тем самым снизить нагрузку на нижележащие элементы;
- внедрение пустотообразователей позволяет унифицировать типоразмер сечения монолитных колонн, тем самым используемой инвентарной опалубки, что влечет за собой снижение расходов на аренду или собственную сборку опалубки, сократить площадь временных складов;
- введение пустотообразователей в тело бетона при эксцентриситете 75 мм позволяет увеличить предельную нагрузку момента образования трещин на 11,42%;
- при увеличении величины эксцентриситета с 150 мм до 212,5 мм уменьшается разница относительных деформаций в растянутой арматуре с 8,75% до 3,70%;
- максимальная эффективность использования пустотообразователей достигается при большем эксцентриситете, также использование пустотообразователей в высотных монолитных железобетонных зданиях на верхних этажах, когда сечение колонны подбирается в результате требования устойчивости, а не несущей способности;
- можно сказать, что применение пустотообразователей в железобетонных внецентренно сжатых элементах рационально.

Список используемой литературы и используемых источников

1. Альтшулер Б. А., Немировский Я. М. Влияние начальных состояний железобетона на деформации и раскрытие трещин в нем // Бетон и железобетон. 1979. № 1. С. 29-31.
2. Аль-Хаваф А.Ф.-К., Никулин А.И. Деформирование центрально сжатых железобетонных колонн из бетона с добавлением крупного заполнителя из бетонного щебня // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2019. №5. С. 66-76.
3. Антонов К. К., Житницкая Э.А., под. ред. Келдыша В. М. Осевое и внецентренное сжатие железобетонных колонн с арматурой двутаврового профиля // Исследование конструкций высотных зданий: Сборник трудов, 1953. 232 с.
4. Арискин М.В., Блдырев С.А. Методы экспериментальных исследований строительных конструкций. Определение физико-механических свойств строительных конструкций современными приборами // учеб. Пособие; под общ. Ред. Д-ра техн. наук, проф. Скачкова Ю. П. – Пенза: ПГУАС, 2015. 80 с.
5. Ахметзянов Ф.Х. Диаграммы напряжения и деформации бетона и их использование для определения параметров и критериев повреждаемости при кратковременном и продолжительном нагружениях бетонных и железобетонных элементов (часть 1) // Известия КГАСУ. 2010. №1 С. 89-95.
6. Бабич С.В. Исследование и расчет внецентренно сжатых элементов с переменными эксцентриситетами по длине // Бетон и железобетон. 1999. №2. С. 12-13.
7. Бетоны. Материалы. Технологии. Оборудование / Р.: Стройинформ, 2006, 424 с.
8. Брыжатый Э.П. Исследование трещиностойкости и некоторых вопросов прочности коротких внецентренно сжатых с малыми эксцентриситетами бетонных и железобетонных элементов [Текст]:

Автореферат дис. на соискание ученой степени кандидата технических наук. (480) / Науч.-исслед. ин-т бетона и железобетона. – Москва: [б. и.], 1969. 18 с.

9. Васильев А.П., Матков Н.Г., Мирмуминов М.М. Местное сжатие в колоннах каркаса многоэтажных зданий // Бетон и железобетон. 1977. №9. С. 30-33.

10. Габрусенко В.В. Некоторые особенности проектирования железобетонных конструкций по новым нормам // Проектирование и строительство в Сибири. – Новосибирск, 2007. №2. С. 15-17.

11. ГОСТ 577-68. Индикаторы часового типа с целой деления 0,01 мм. Технические условия. [Электронный ресурс]: Утвержден и введен в действие комитетом стандартов, мер и измерительных приборов при Совете Министров СССР 05.02.68 URL: <https://spb.koround.ru/upload/iblock/7e4/7e418abc0f1ee7e9b2586e474ea2c53a.pdf> (дата обращения: 14.01.2024).

12. ГОСТ 2633-2015. Бетоны тяжелые и мелкозернистые. Технические условия. [Электронный ресурс]: Утвержден приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 17 марта 2016 г. №165-ст URL: <https://www.mos.ru/upload/documents/files/2117/GOST26633-2015.pdf>. (дата обращения: 29.09.2023).

13. ГОСТ 7473-2010. Смеси бетонные. Технические условия. [Электронный ресурс]: Утвержден приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 13 мая 2011 г. №71-ст. URL: <https://www.mos.ru/upload/documents/files/7149/GOST7473.pdf>. (дата обращения: 23.07.2023).

14. ГОСТ 8829-2018. Изделия строительные железобетонные и бетонные заводского изготовления. Методы испытаний нагружением. Правила оценки прочности, жесткости и трещиностойкости. [Электронный ресурс]: Утвержден приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 18 апреля 2019 г. № 141-ст. URL: <https://internet-law.ru/gosts/gost/70864>. (дата обращения: 21.08.2023).

15. ГОСТ 10180-2012. Бетоны. Методы определения прочности по контрольным образцам. [Электронный ресурс]: Утвержден приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 27 декабря 2012 г. № 2071-ст. URL: <http://www.nppskmost.ru/files/gost-10180-2012.pdf>. (дата обращения: 18.09.2023).

16. ГОСТ 10181-2014. Смеси бетонные. Методы испытаний. [Электронный ресурс]: Утвержден приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 11 декабря 2014 г. №1972-ст. URL: https://www.nilstroj.ru/upload/documents/04_gost-10181-2014-smesi-betonnye-metody-ispytaniy.pdf. (дата обращения: 10.02.2024).

17. ГОСТ 12730.1-78. Бетоны. Методы определения плотности. [Электронный ресурс]: Утвержден и введен в действие Постановлением Государственного комитета СССР по делам строительства от 22.12.78 №242. URL: <https://concreteunion.ru/wp-content/uploads/2019/12/23.pdf>. (дата обращения: 10.02.2024).

18. ГОСТ 12801-98. Материалы на основе органических вяжущих для дорожного и аэродромного строительства. Методы испытаний. [Электронный ресурс]: Утвержден Межгосударственной научно-технической комиссией по стандартизации, техническому нормированию и проектным институтом Союздорнии Российской Федерации. Принят 12 ноября 1998 г. URL: <https://internet-law.ru/gosts/gost/43662/>. (дата обращения: 10.02.2024).

19. ГОСТ 13015-2012. Изделия бетонные и железобетонные для строительства. Общие технические требования. Правила приемки маркировки, транспортирования и хранения. [Электронный ресурс]: Утвержден приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 27 декабря 2012 г. №2072-ст. URL: <https://www.mos.ru/upload/documents/files/1299/GOST13015-2012.pdf>. (дата обращения: 15.11.2023).

20. ГОСТ 18105-2018. Бетоны. Правила контроля и оценки прочности. [Электронный ресурс]: Утвержден приказом Федерального агентства по

техническому регулированию и метрологии от 12 апреля 2019 г. № 130-ст. URL: <https://www.mos.ru/upload/documents/files/2071/GOST18105-2018.pdf>. (дата обращения: 03.03.2024).

21. ГОСТ 18979-2014. Колонны железобетонные для многоэтажных зданий. Технические условия. [Электронный ресурс]: Утвержден приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 22 октября 2014 г. №1373-ст. URL: <https://internet-law.ru/gosts/gost/58151/>. (дата обращения: 09.10.2023).

22. ГОСТ 22690-2015. Бетоны. Определение прочности механическими методами неразрушающего контроля. [Электронный ресурс]: Утвержден приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 25 сентября 2015 г. №1378-ст. URL: <https://internet-law.ru/gosts/gost/60768/>. (дата обращения: 09.03.2024).

23. ГОСТ 24452-80. Бетоны. Методы определения призмочной прочности, модуля упругости, коэффициента Пуассона. [Электронный ресурс]: Установлена Постановлением Государственного комитета СССР по делам строительства от 18 ноября 1980 г. № 177. URL: <https://internet-law.ru/gosts/gost/3482/>. (дата обращения: 09.03.2024).

24. ГОСТ 25192-2012. Бетоны. Классификация и общие технические требования. [Электронный ресурс]: Утвержден приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 27 декабря 2012 г. №2003-ст. URL: <https://servisbeton.ru/content/uploads/2019/04/gost-25192-2012.pdf>. (дата обращения: 06.03.2024).

25. ГОСТ 28836-90. Датчики силоизмерительные тензорезисторные. Общие технические требования и методы испытаний. [Электронный ресурс]: Утвержден и введен в действие Постановлением Государственного комитета СССР по управлению качеством продукции и стандартам от 29.12.90 №3510. URL: <https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4294825/4294825885.pdf>. (дата обращения: 06.03.2024).

26. Ерышев В.А. Методы и средства испытаний железобетонных конструкций: Учеб. пособие для вузов. – Тольятти: ТГУ, 2007. 64 с.
27. Железобетонные конструкции. Основы теории, расчета и конструирования. – Брест: Брестская Типография БГТУ, 2003. С. 72-74, 277-280.
28. Иващенко Е.И. Разработка методов расчета железобетонных элементов на основе действительных диаграмм деформирования материалов с учетом фактического изменения площади их поперечных сечений: дис. канд. техн. наук. Воронеж, 2006. 230 с.
29. Яров В.А., Медведева О.П., Колдырев В.И., Щербаков Л.В. Испытание железобетонных конструкций: Учебное пособие – Красноярск, КрасГАСА, 1999. 98 с.
30. 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. – М.: 2013. - №1 - С. 25-27.
31. Ключков А.Г., Чистяков Е.А. К расчету несущей способности гибких внецентренно-сжатых железобетонных элементов кольцевого сечения. Львов, Вестник ЛПИ, 1966, Том 3, № 2, С. 15-26.
32. Коноплев С. Н. Организация контроля прочности бетона монолитных конструкций по образцам. Ч. 1. – Текст: непосредственный // Технологии бетонов. 2015. № 3/4. С. 36-39: ил. - ISSN 1813-9787.
33. Краковский М.Б., Тихонов И.Н. Особенности расчетов нормальных сечений железобетонных конструкций по СП 63.13330.2018 // Бетон и железобетон. 2023. №4 (618). С. 5-11.
34. Кришан А.Л., Трошкина Е.А., Чернышова Э.П., Ильин А.Н. Прочность и деформативность бетона железобетонных колонн с косвенным армированием // Journal of Engineering and Applied Sciences. 2017. №12(24). С. 7562-7566.

35. Обернихин Д.В., Никулин А.И. Экспериментальные исследования деформативности изгибаемых железобетонных элементов различных поперечных сечений // Вестник БГТУ им. В. Г. Шухова. 2017. №4. С. 56-59.

36. Пирадов А.Б., Аробенидзе В.И., Худишвили Т.Т. К расчету несущей способности внецентренно сжатых элементов // Бетон и железобетон. 1986. №1. С. 43-44.

37. Поздеев В.М., Иванова Л.Ю. Эффективная железобетонная колонна // Инновации в строительной индустрии 2014: материалы I Брянского международного молодежного форума. Брянск: БГИТА, 2014. С. 80-84.

38. Поздеев В.М., Микрюков Д.А. Компьютерное моделирование напряженно-деформированного состояния железобетонных сжатых элементов эффективного сечения // Актуальные проблемы современной науки, техники и образования: материалы 74-й международной научно-технической конференции. Магнитогорск: МГТУ, 2016. Том 2. С. 46-49.

39. Расчет железобетонных конструкций без предварительно напряженной арматуры /сост.: методическое пособие разработано авторским коллективом специалистов НИИСФ РАССН под руководством Трекина Н.Н.: Москва, 2015. – 293 с.

40. СП 20.13330.2016. Нагрузка и воздействия. Актуализированная редакция СНиП 23-03-2003 (с Изменениями № 1, 2, 3). [Электронный ресурс]: Утвержден приказом Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации (Минстрой России) от 3 декабря 2016 г. №891/пр и введен в действие с 4 июня 2017 г. URL: <https://sro-a.ru/upload/medialibrary/5fe/imc8q10oy3xih6w2en7nt94zp63b3926/SP-20.13330.2016.-Svod-pravil.-Nagruzki-i-vozdeystviya.-Aktua.pdf> (дата обращения: 20.04.2024)

41. СП 63.13330.2018. Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения. Актуализированная редакция СНиП 52-01-2003. [Электронный ресурс]: Утвержден приказом Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации от 19 декабря 2018

г. №832/пр и введен в действие с 20 июня 2019 г. URL: https://ano-alpha.ru/upload/iblock/58c/mjvjzkirysdmzq31jd53bipez0mxsqd5/SP_63.13330.2018_-2.pdf. (дата обращения: 13.03.2024)

42. СП 70.13330.2012. Несущие и ограждающие конструкции. Актуализированная редакция СНиП 3.03.01-87 (с Изменениями №1, 3). [Электронный ресурс]: Утвержден приказом Федерального агентства по строительству и жилищно-коммунальному хозяйству (Госстрой) от 25 декабря 2012 г. №109/ГС и введен в действие с 1 июля 2013 г. URL: <https://mchs.gov.ru/uploads/document/2022-03-16/76b28310ae906e1007b6ac4f42421b7d.pdf>. (дата обращения: 19.03.2024)

43. СП 435.1325800.2018. Конструкции бетонные и железобетонные. Правила производства и приемки работ. [Электронный ресурс]: Утвержден приказом Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации от 26 ноября 2018 г. № 746/пр и введен в действие с 27 мая 2019 г. URL: <https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4293730/4293730484.pdf>. (дата обращения: 17.03.2024)

44. Стороженко Л.И. Эффективность сжатых элементов с различными способами армирования // Известия вузов. Строительство и архитектура. 1981. № 6. С. 26 - 29.

45. Тошин Д. С. Прикладные возможности деформационной модели железобетона // Молодой ученый. – 2016. – № 29 (133). – С. 164-166. URL: <https://moluch.ru/archive/133/37136/> (дата обращения: 20.10.2023).

46. Тошин Д.С., Долгополов Д.А. Прочность, жесткость и трещиностойкость модели облегченной плитной конструкции со сферическими пустотообразователями // Градостроительство и архитектура. 2023. Т. 13. №1 (50). С. 10-16.

47. Тошин Д.С., Булгаков М.Е., Жданов Д.Г. Несущая способность железобетонных балок, облегченных несъемными сферическими пустотообразователями // Эксперт: теория и практика. 2024. №1 (24) С. 61-66.

48. Чайка В.П. Аналитический метод определения напряженного состояния постоянных по ширине сжатой зоны изгибаемых и внецентренно нагруженных элементов при кратковременном действии нагрузки - М.: деп. во ВНИЭС Минстройматериалов СССР, 1978. 267. 53 с.

49. Aktham H. Alani, N. Muhamad Bunnori, Ahmed Tareq Noaman, T.A. Majid. Durability performance of a novel ultra-high-performance PET green concrete (UHPPGC). *Construction and Building Materials*, 2019, vol. 209, pp. 395-405.

50. Butler L., West J.S., Tighe S.L., The effect of recycled concrete aggregate properties on the bond strength between RCA concrete and steel reinforcement, *Cement and Concrete Research*, 2011, vol. 41, №10, pp. 1037-1049.

51. Darko Tasevski, Miguel Fernández Ruiz, Aurelio Muttoni, Compressive strength and deformation capacity of concrete under sustained loading and low stress rates, *Journal of Advanced Concrete Technology*, 2018, vol. 16, pp. 396-415.

52. Eurocode 2: EN 1992-1-1:2004: Design of concrete structures — Part 1-1: General rules and rules for buildings. - Brussels. - 2004. - 225 p.

53. Fattah A.M. Behaviour of concrete columns under various confinement effects: A dissertation doctor of philosophy/ Fattah Ahmed Mohsen - Kansas, USA: Kansas State University, 2012. - 399 p.

54. Ipeei Maruyama, Pietro Lura. Properties of early-age concrete relevant to cracking in massive concrete. *Cement and Concrete Research*, 2019, vol. 123, 105770.

55. Mark Alexander, Hans Beushausen. Durability, service life prediction, and modelling for reinforced concrete structures - review and critique. *Cement and Concrete Research*, 2019, vol. 122, pp. 17-29.