

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 Экспериментальная оценка эффекта обоймы при усилении  
конструкций стальными элементами

Обучающийся

А.В. Брусницына

(Инициалы Фамилия)



(личная подпись)

Научный  
руководитель

канд. техн. наук, доцент, Д.С. Тошин

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

Консультант

канд. пед. наук, доцент, О.Н. Брега

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

Рецензент

канд. техн. наук, д-р. экон. наук, профессор, А.А. Руденко

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

Тольятти 2023

## Оглавление

|   |    |
|---|----|
| Введение .....  | 3  |
| Глава 1 Обзор литературы. Постановка задач исследования .....                     | 6  |
| 1.1 Значение реконструкции для строительной отрасли .....                         | 6  |
| 1.2 Способы усиления конструкций .....  | 10 |
| 1.3 Применяемые материалы при усилении .....                                      | 20 |
| Глава 2 Программа экспериментальных исследований .....                            | 26 |
| 2.1 Расчет и проектирование модели усиливаемых образцов .....                     | 26 |
| 2.2 Характеристика и изготовление партии образцов.....                            | 30 |
| 2.3 Проведение испытаний .....  | 33 |
| Глава 3 Обработка результатов испытаний, сравнительный анализ.....                | 43 |
| 3.1 Обработка полученных результатов экспериментальных исследований<br>.....      | 43 |
| 3.2 Разработка деформационной модели для получения теоретических<br>значений..... | 51 |
| 3.3 Сравнительный анализ теоретических и экспериментальных значений               | 63 |
| Заключение .....  | 69 |
| Список используемой литературы и используемых источников .....                    | 70 |

## Введение

В настоящий момент накопились обширные сведения о методах усиления железобетонных конструкций, появился большой выбор материалов для усиления. Однако существующая нормативная база по усилению строительных конструкций все еще несовершенна в силу отсутствия достаточного количества экспериментальных исследований в данной области.

Актуальность и научная значимость настоящего исследования состоит в том, что на данный момент все еще нет общепринятого расчета усиления железобетонных конструкций стальной обоймой. Но при этом, потребность в усилении строительных конструкций существующих зданий является такой же важной, как потребность в новых зданиях и сооружениях. В связи с чем, пополнение экспериментальных данных для продолжения изучения выбранной темы является актуальной задачей.

Цель исследований – оценка влияния эффекта обоймы на прочностные и деформативные параметры усиленных сжатых элементов.

Для достижения указанной цели были поставлены следующие задачи:

- провести литературный обзор для уточнения научной новизны и актуальности исследования;
- разработать программу экспериментального исследования;
- запроектировать модель усиливаемых образцов;
- провести испытание усиленных образцов при центральном и внецентренном сжатии;
- получить теоретические значения разрушающих усилий с деформационной модели;
- разработать предложения по учету эффекта обоймы в деформационной модели при расчете сжатых бетонных элементов, усиленных стальной обоймой.

Предметом исследования магистерской диссертации является физико-механические параметры бетона в условиях работы в обойме.

Объект исследования магистерской диссертации – сжатый бетонный элемент, усиленный стальной обоймой.

Методы исследования, которые использовались в данной магистерской диссертации:

- проведение эксперимента (метод эмпирического исследования),
- проведение сравнительного анализа (метод эмпирического исследования).

Научная новизна диссертационной работы, заключается в следующем:

- получение численных значений эффекта обоймы;
- расчет усиленного железобетонного элемента по нелинейной деформационной модели с учетом экспериментальных значений;
- определение зависимости прочностных характеристик путем изменения начального модуля упругости в расчете по деформационной модели.

Теоретическая значимость исследования заключается в учете эффекта обоймы при расчете усиления железобетонных колонн.

Практическая значимость исследования состоит в:

- применении полученных значений в расчете усиления железобетонных колонн в промышленных и гражданских зданиях;
- пополнении базы по проведению экспериментов в теме усиления железобетонных строительных конструкций стальными элементами.

Апробация и внедрение результатов работы осуществлялись на протяжении выполнения магистерской диссертации. Полученные экспериментальные значения, подкрепленные теоретическими, были представлены на научно-исследовательских выступлениях:

- научно-исследовательский семинар по итогам производственной практики (научно-исследовательская работа) 1, Тольяттинский государственный университет, январь 2022 г.;

- научно-исследовательский семинар по итогам производственной практики (научно-исследовательская работа) 2, Тольяттинский государственный университет, июль 2022 г.;
- научно-исследовательский семинар по итогам производственной практики (научно-исследовательская работа) 3, Тольяттинский государственный университет, январь 2023 г.;
- научно-исследовательский семинар по итогам производственной практики (научно-исследовательская работа) 4, Тольяттинский государственный университет, май 2023 г.;
- научно-практическая конференция «Студенческие Дни науки ТГУ» с публикацией тезисов в сборнике, Тольяттинский государственный университет (Тольятти, 2022 г.).

Также автором диссертации была опубликована 1 статья в научном издании:

- публикация статьи «Об инновациях на объектах капитального строительства» в Выпуске 03 Современные вопросы строительных материалов и конструкций, ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарёва».

## **Глава 1 Обзор литературы. Постановка задач исследования**

### **1.1 Значение реконструкции для строительной отрасли**

В настоящее время наблюдается тенденция массового нового строительства, но наряду с появлением новых застроек происходит износ зданий и сооружений, построенных ранее. «Количество жилищного фонда в период с 1966 – 1995 г. превышает на 20% количество жилищного фонда в период с 1995 – 2023 г. Для первого периода характерно строительство так называемых «хрущевок» – панельные и кирпичные дома по типовым сериям, основным назначением которых являлось обеспечение граждан дешевым жильем с целью ускоренного переселения граждан в города из деревень и сёл. Таким образом, наибольшей частью жилищного фонда по состоянию на 2023 г. являются именно дома данного типа» [16].

Для того чтобы определить в каком состоянии находятся несущие конструкции и само здание в целом, назначается обследование. При обследовании определяется возможность дальнейшей эксплуатации здания, необходимость проведения реконструкции или капитального ремонта.

«Обследование и мониторинг технического состояния зданий и сооружений проводят также:

- по истечении нормативных сроков эксплуатации зданий и сооружений;
- при обнаружении значительных дефектов, повреждений и деформаций в процессе технического обслуживания, осуществляемого собственником здания (сооружения);
- по результатам последствий пожаров, стихийных бедствий, аварий, связанных с разрушением здания (сооружения);
- по инициативе собственника объекта;
- при изменении технологического назначения здания (сооружения);

- по предписанию органов, уполномоченных на ведение государственного строительного надзора» [7].

По мнению В.В. Теряника «будет правильно систему обследования и усиления колонн представить в виде общего алгоритма» (рис. 1) [21].

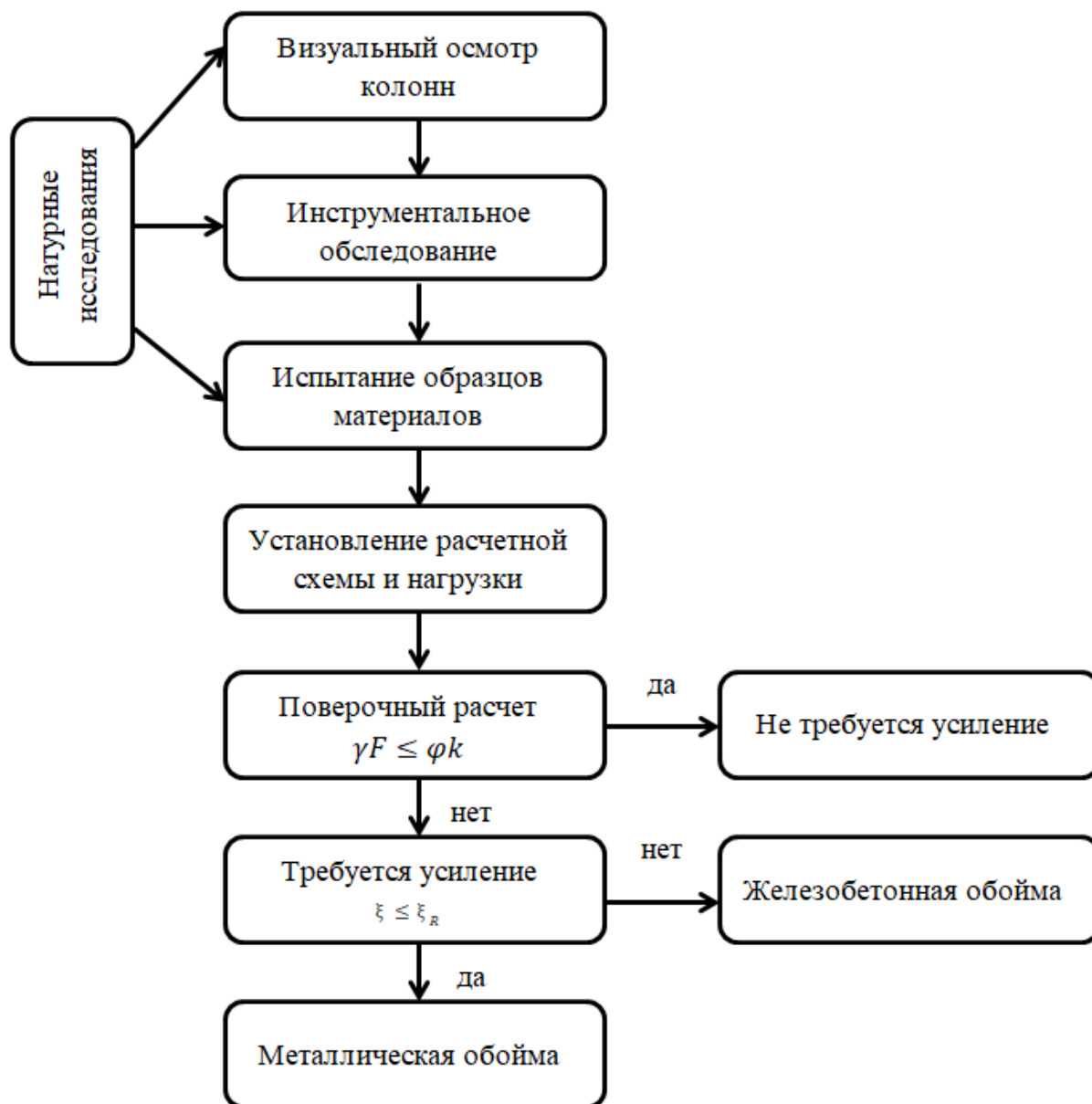


Рисунок 1 – Алгоритм обследования и усиления колонн [21]

Категории технического состояния здания делятся на 4 подвида: нормативно техническое состояние, работоспособное состояние, ограниченно-работоспособное состояние, аварийное состояние.

Для зданий и сооружений, находящихся в нормативном техническом и работоспособном состоянии разрешается эксплуатация без ограничений. При ограниченно-работоспособном состоянии назначается контроль над их состоянием, возможно проектирование мероприятий по восстановлению, либо усилению конструкций. В аварийном состоянии эксплуатация объекта не допускается.

Но не только физический износ характеризует техническое состояние жилого, общественного и промышленного фонда. Существует такое понятие, как моральный износ. Моральный износ бывает первого и второго рода. Первого рода подразумевает уменьшение текущей стоимости здания в связи с научно-техническим прогрессом и удешевлением строительства подобного здания в новых условиях. Износ моральный второго рода означает понижение стоимости здания или его элементов относительно новых подобных. «В отличие от морального износа первой формы, не связанного с дополнительными затратами, моральный износ второй формы поглощает почти треть стоимости капитального ремонта, а иногда и больше» [26]. К примеру, для устранения морального износа может быть предложена реконструкция, в виде увеличения площади здания.

В соответствии с градостроительным кодексом, под словом реконструкция, понимается изменение параметров объекта, его этажности, его объемно-планировочных характеристик, а также полную замену/восстановление несущих конструкций объекта капитального строительства.

Причины для проведения реконструкции могут быть как субъективными, так и объективными. К первым можно отнести несвоевременное проведение текущих и капитальных ремонтов, низкое качество технической эксплуатации, что приводит к преждевременному износу несущих конструкций. Ко вторым относится естественный износ, смена представлений о комфорте, научно-технический прогресс.



Помимо реконструкции, связанной с увеличением площади жилых и нежилых помещений, модернизацией производства (при реконструкции действующих предприятий может происходить расширение отдельных зданий и сооружений, увеличение существующих цехов), есть еще вид реконструкции, связанный с сохранением объектов культурного наследия.

Таким образом, в нашей стране реконструкция является неотъемлемой частью строительной отрасли.

Исследовав зарубежную литературу по данному вопросу, можно сделать вывод, что понятие реконструкции тоже стоит не на последнем месте. К примеру, в итальянской статье Алессии Мангиалардо и Эцио Миечелли поднимается вопрос повторного использования зданий и сооружений, с учетом проведения реконструкции, под названием «Восстановление городов и сдерживание землепользования – два приоритета итальянской и международной территориальной политики» [28].

При малых объемах по восстановлению несущих конструкций назначается капитальный ремонт.

Капитальный ремонт подразумевает восстановление параметров объекта, в соответствии с действующими строительными правилами, ГОСТами, а также частичную замену/усиление строительных конструкций.

При капитальном ремонте основные показатели здания не изменяются, такие как, площадь постройки, количество этажей, строительный объем. Капитальный ремонт зданий назначается при крене, разрушении, износе отдельных несущих конструкций объекта. Такой вид ремонта может быть как выборочным, так и комплексным.

Одна из главных причин для проведения капитального ремонта – это износ конструкций. Износ конструкций с годами увеличивается. На него влияет множество факторов, таких как, длительная и неправильная эксплуатация, износ материалов, агрессивное воздействие атмосферных осадков, биологические факторы, ошибки при проектировании и другие, в связи с чем, на несущих конструкциях появляются трещины, недопустимые

прогибы, оголение арматуры. При выявлении данных дефектов проводят обследование конструкций и принимают решение, что будет экономически целесообразнее, снос здания или подбор необходимого усиления.

С 2022 года вступает в силу Постановление Правительства Российской Федерации №331 о введении обязательного использования технологий информационного моделирования на объектах госзаказа, что значительно упростит своевременное назначение капитального ремонта или реконструкции. Отслеживать состояние здания можно будет по его информационной модели, что вносит новый виток развития в строительной отрасли. Так, например, в статье Чжиган Шэнь из Линкольна представлены достоинства 3D-реконструкции на строительной площадке с помощью Visual SLAM и БПЛА [31]. А в статье «Информационное моделирование при эксплуатации зданий и сооружений» Деменев А.В. и Артамонов А.С. привели сокращение затрат на эксплуатацию элементов конструкций зданий и сооружений в процентном соотношении, при использовании мониторинга с помощью автоматизированной системы управления зданием (BMS). «BIM управляет процессами жизненного цикла здания и является объективным источником информации с высокой степенью достоверности для поддержания модели в актуальном виде постоянно изменяться, дополняться, заменяться, отражая текущее состояние здания» [5].

Таким образом, в современном мире наблюдается совершенствование в сфере своевременного выявления дефектов строительных конструкций, а нормативная база по усилению обследованных конструкций развивается медленнее.

## **1.2 Способы усиления конструкций**

Методы усиления конструкций подразделяются на 2 вида: уменьшение усилий и увеличение сечения. То есть, формула усиления выглядит так:  $F \leq$

$F_{ult}$ . Требуется либо уменьшать приложенную нагрузку на конструкцию, либо увеличивать площадь сечения.

В свою очередь методы усиления подразделяются на следующие способы. Например, разные виды усиления по материалу конструкции (усиление металлических конструкций, усиление железобетонных конструкций, усиление конструкций из дерева).

«Основные способы усиления конструкций:

- увеличение сечения элементов и их соединений за счет присоединения к ним новых элементов;
- введение дополнительных элементов (связей, ребер, диафрагм и т.д.), уменьшающих расчетные длины несущих элементов конструкций и повышающих их устойчивость;
- разгрузка конструкций за счет замены тяжелых плит или утеплителя на легкие; установка ограничителей, изменяющих расположения колес двух кранов, снижение их грузоподъемности; снятие части тяжелого оборудования; создания разгружающих консолей;
- изменение закрепления концов стержней, например, шарнирного на жесткое, превращение однопролетных систем в многопролетные и т.д.;
- устройство дублирующих элементов;
- введение затяжек, шпренгелей, тяжей с созданием предварительного напряжения в конструкциях;
- применение распорных устройств, снижающих расчетное усилие в сечениях элементов, а также подкосов, оттяжек, расчалок;
- включение в совместную работу соприкасающихся элементов, например плит с балками или фермами и т.д.;
- регулирование высотой (осадками) опор в статически неопределимых системах;
- превращение рам и арок в фермы или ферм в распорные системы;
- завальцовка или вклеивание растянутой проволоки;

- упругий выгиб отдельных частей с последующим их соединением;
- введение дополнительных элементов или конструкций, обеспечивающих пространственную работу покрытия или всего каркаса;
- изменение свойств материала, например, упрочнение грунтов, древесины и т.д.;
- замена дефектных частей протезами или новыми элементами» [9].

То есть, для разных конструкций, из различных материалов, есть разработанный свой метод усиления, который назначается в соответствии с обследованием заданной конструкции, учетом всех действующих нагрузок, экономическом обосновании выбранного метода усиления.

«В новых экономических условиях большая часть зданий и сооружений нежилого фонда многих городов России, как правило, поменяло характер использования» [21]. Что приводит к возможным большим нагрузкам, смене температурного режима при использовании помещений, увеличении площадей. Чаще всего, такие промышленные и общественные здания выполнялись в каркасной системе, где основными элементами, воспринимающими нагрузку, являются колонны, балки, ригеля, фермы. В связи с чем, именно эти конструкции воспринимают на себя все неблагоприятные условия эксплуатации.

На конструкциях могут появляться различные дефекты, которые приводят к изменению несущих показателей. А также дефекты могут возникнуть еще до ввода в эксплуатацию, что может привести к необходимости проведения усиления. Так, например, в работе В.В. Теряника выделяются следующие виды дефектов колонн.

«Дефекты колонн, связанные с несовершенством проектных решений. Наибольшее количество дефектов в колоннах приходится на стык. Опыт строительство показал, что в условиях строительной площадки данный вопрос не решается должным образом, поскольку наличие указанных дефектов в колоннах (стыки) говорит о том, что проектные решения стыков

являются несовершенными и требуют внимания при разработке решений усиления. Дефекты колонн, вызванные ошибками при их изготовлении. При изготовлении колонн возможные основные дефекты, в виде несоответствия диаметра, количества и классов стали арматурных стержней, их положения в сечении элемента проектным условиям, снижение класса бетона, пропуск или смещение закладных деталей, несоответствие выпусков арматуры в стыковых узлах сопряжения элементов проектному положению, несоблюдение толщины защитного слоя бетона, предусмотренного нормами, отклонение геометрических размеров от проектных, наличие трещин, сколов в бетоне. Дефекты колонн, вызванные ошибками при их монтаже. Наиболее распространенными дефектами колонн, вызванными ошибками при их монтаже являются смещение колонн с проектных осей, несоблюдение высотных отметок колонн и их консольных выступов, несовпадение колонн в стыковых сопряжениях, нарушение последовательности монтажа каркаса и связей, омоноличивание стыков колонн бетоном низкого качества» [21].

Если рассматривать усиления железобетонных колонн более подробно, то наиболее распространенным способом является метод усиления стальной облойкой. «Как показал анализ способов усиления сжатых железобетонных конструкций, облойки считаются самым простым и надежным конструктивным решением усиления и поэтому применяются достаточно часто» [20].

«В случаях усиления центрально- и внецентренно сжатых колонн под нагрузкой как весьма эффективный и сравнительно простой способ рекомендуется устройство предварительно напряженных металлических распорок, представляющих собой конструкцию типа металлических облой с напряженными стойками» [17].

Методика усиления с помощью распорок, согласно рекомендациям по проектированию усиления железобетонных конструкций зданий и сооружений реконструируемых предприятий [17] состоит в следующем: «конструкция распорки состоит из двух/четырёх уголков, связанных между

собой приваренными соединительными планками из листового металла. Вверху и внизу каждого уголка распорки необходимо приварить специальные планки, посредством которых распорка передает нагрузки при монтаже, натяжении и эксплуатации на упорные уголки. Упорные уголки, устанавливаются на элементах конструкций, непосредственно примыкающих к усиливаемым колоннам (ригелях, балках, обрезках фундаментов и т.п.). Внутренние плоскости полок этих уголков должны быть заделаны заподлицо с наружными боковыми поверхностями усиливаемых колонн. При их установке рекомендуется предварительно скалывать защитный слой и укладывать слой цементного раствора. Установка уголков производится строго горизонтально. Упорные планки распорок выполняются из полосовой или листовой стали и должны быть не тоньше 15 мм, а по площади соответствовать сечению распорок. Монтаж распорок производится с перегибом их в середине высоты».

Насколько будет эффективно усиление стальной обоймой, напрямую зависит от примыкания по торцам металлических стоек. «Эффективность усиления металлической обоймой значительно возрастает, если пояса вокруг колонны, образованные соединительными планками, выполнить предварительно напряженными. Ввод в напряженное состояние металлических поясов рекомендуется осуществлять следующим образом: соединительные планки каждого из поясов устанавливают на одном уровне и приваривают одной стороной к стойкам; затем приступают к замыканию среднего по высоте колонны пояса, для чего нагревают соединительные планки двух противоположных граней до температуры 100°C и приваривают к стойкам в нагретом состоянии. Аналогично поступают с планками смежных граней. Таким же образом замыкают остальные пояса обоймы. По мере остывания нагретых соединительных планок усиливаемая колонна подвергается обжатию металлическими поясами» [17].

Если рассматривать зарубежных авторов, то есть интересная статья авторов Xiantao Zeng и Zhenhua Ren из Китая, в которой предлагается новый

способ усиления, в виде применения двунаправленных предварительно напряженных угловых стальных пластин (см. рис. 2) [30]. Преимущество данного способа, как утверждают авторы, в создании контролируемого обжатия. «Предварительно напряженная распорка сочетается с предварительно напряженным стальным «обручем» для усиления колонны с высокой степенью осевого сжатия» [30].

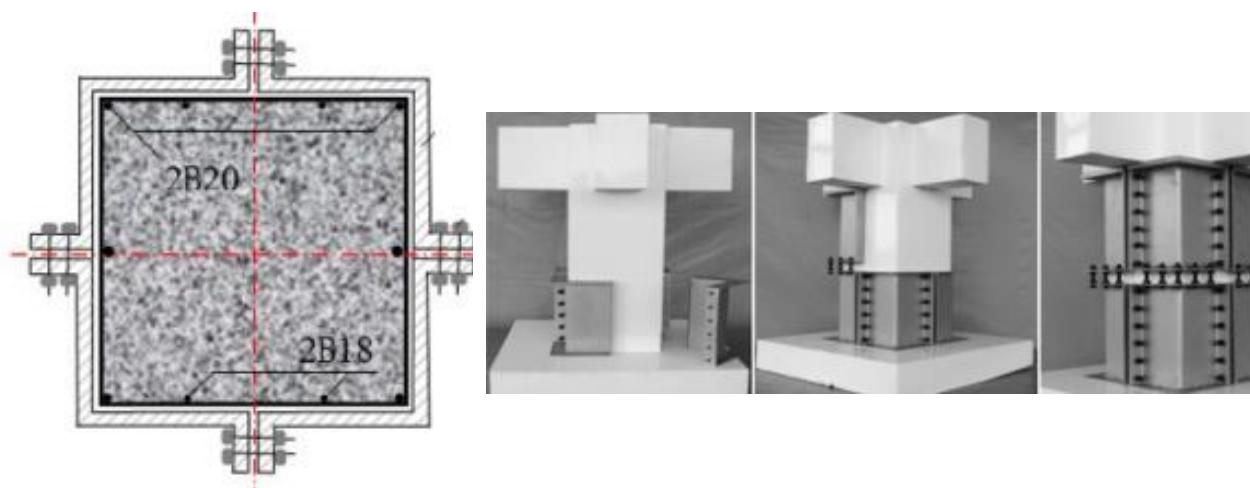
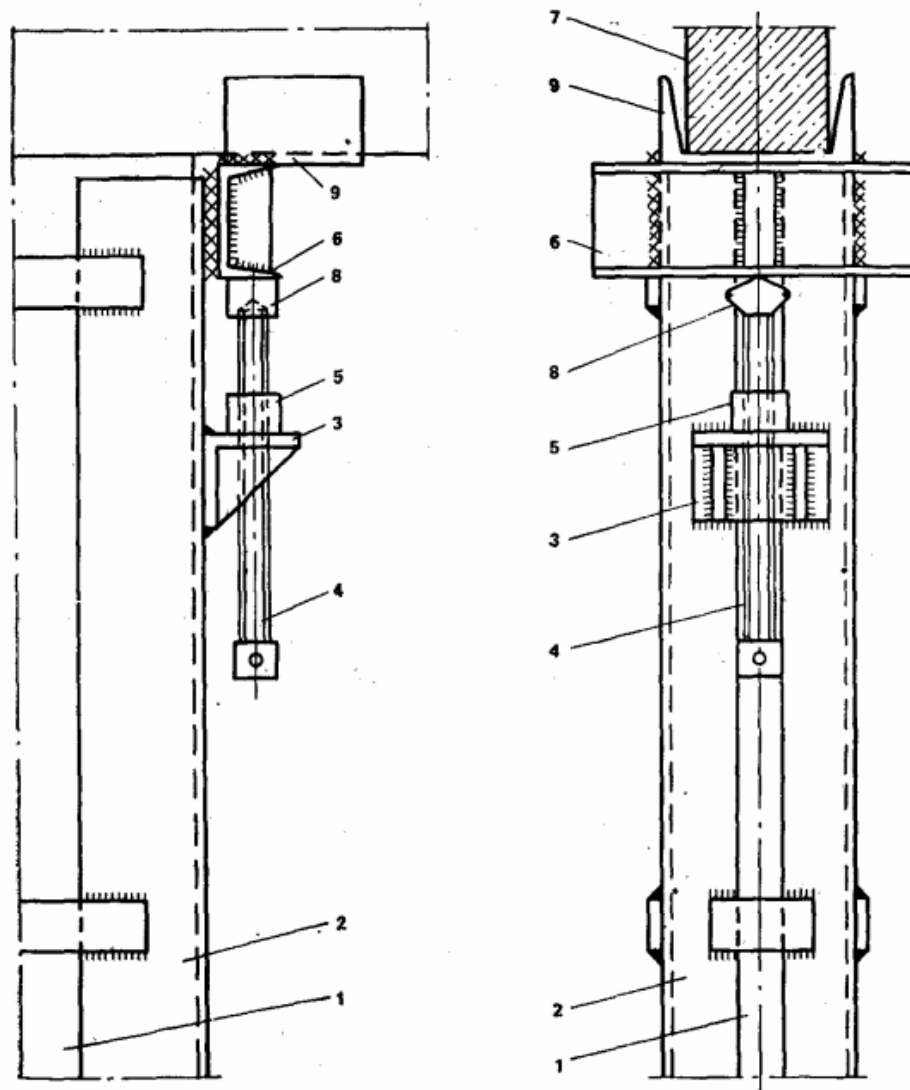


Рисунок 2 – Приспособление для включения в работу металлической обоймы колонны [30]

Также создание предварительного напряжения может выполняться с помощью выпрямления сжатых распорок из-за закручивания гаек натяжных болтов.

Для включения в совместную работу колонны и обоймы применяют специальные приспособления, пример данного приспособления представлен на рисунке 3.



1 – усиливаемая колонна; 2 – обойма; 3 – столик; 4 – металлический винт; 5 – гайка; 6 – упорный элемент; 7 – ригель; 8 – динамометр; 9 – прокладка

Рисунок 3 – Приспособление для включения в работу металлической обоймы колонны [17]

Расчет данного вида усиления состоит из следующих пунктов:

- определение численных характеристик сопротивлений по справочным данным;
- подсчет нагрузок;
- определение продольной расчетной силы в колонне;
- определение несущей способности;
- подсчет величины продольной силы, воспринимаемой колонной;



- расчет требуемой площади сечения распорок;
- определение продольной силы, воспринимаемой колонной после усиления;
- проверка условия несущей способности.

Для проведения сравнительного анализа литературных источников по видам усиления железобетонных колонн, были рассмотрены работы следующих авторов: Мосин М.В., Мансур Хасан, Муленкова В.И., Артюшин Д.В., Габрусенко В.В., Игнатенко А.В., Семенюк С.Д., Мельянцова И.И., Башкиров В.В., Маяцкая И.А., Федченко А.Е., Дохойн Е.В., Ваганова С.Е., Теряник В.В., К. Ли. Дж. Ф. Боначчи.

В работе Мосина М.В. [14] рассмотрен вопрос оценки эффекта и эффективности усиления железобетонных колонн с возможностью обжатия. В теме рассматриваются преимущества усиления с возможностью обжатия, «закрывающееся в возможности создания контролируемого предварительного напряжения тяжей». В работе подчеркивается, что «подобный расчет является приближенным, а для более точного и надежного проектирования необходимо уточнение методики, учитывающей реальное напряженное состояние колонны при нагружении в условиях поперечного обжатия и элементов обоймы, воспринимающих вертикальную нагрузку и отпор обжимаемого бетона», что подтверждает актуальность выбранной тематики.

А в статье Семенюк С.Д., Мельянцова И.И., Башкирова В.В. [18] рассчитываются «сжатые железобетонные элементы, усиленные стальной обоймой для построения трансформированных диаграмм деформирования бетона при трехосном сжатии при различных уровнях бокового обжатия», что более подробно раскрывает тему усиления железобетонных колонн стальными элементами.

В исследовании Маяцкой И.А., Федченко А.Е., Дохойн Е.В., Вагановой С.Е. [12] указывается, что «наиболее распространено усиление ЖБК с помощью стальных и железобетонных обойм и рубашек».

В статье Игнатенко А.В. [8], раскрывается работа бетона со стальной обоймой при действии силовых и температурных нагрузок. «Исследование пожаров показывает, что строительные конструкции, рассчитанные без учета огнестойкости, в условиях пожара могут очень быстро потерять несущую способность».

Работа, рассматривающая новый вид усиления железобетонных колонн стекловолокном, представлена в статье Мансура Хасана [11]. В работе автор говорит, что метод усиления железобетонной колонны стальными элементами имеет свои недостатки, в связи с требованием наличия у данного вида усиления «значительного количества квалифицированной рабочей силы», но при этом указывается недостаток выбранного метода усиления стекловолокном «однако, до сих пор армированные волокном полимеры не были доступны в качестве строительного материала из-за высокой стоимости». То есть, использование стекловолокна на текущий момент экономически не обосновано, в то время, как метод усиления стальными элементами – один из распространенных методов усиления.

На данный момент нормативная база под усиление совершенствуется медленнее, чем для нового строительства, что замедляет развитие данного вида строительного процесса. Например, как отмечает в своей работе Тошин Д.С. «растущие потребности в усилении строительных конструкций промышленных и гражданских зданий требуют более строгого учета влияния уровня нагружения элементов до усиления на конечную несущую способность конструкции» [24].

Немаловажную роль играет влияние эксцентриситета при прикладывании нагрузки на конструкцию. Влияние эксцентриситета при статическом и динамическом нагружении описано в работах Теряника В.В. [21, 4, 22, 23]. В основном, в просмотренных работах по влиянию эксцентриситета приложения нагрузки на усиленные железобетонные конструкции, внимание уделяется усилению железобетонной обоймой, что

подтверждает актуальность раскрытия влияния эксцентриситета при усилении стальной обоймой.

«В действительности, из-за несовершенства геометрических форм элементов конструкций, отклонения их реальных размеров от назначаемых по проекту, неоднородности бетона и других причин обычно центральное сжатие в чистом виде не наблюдается, а происходит внецентренное сжатие с так называемыми случайными эксцентриситетами. По нормам случайный эксцентриситет принимается максимальным из  $1/600$  длины элемента или расстояния между сечениями, закрепленными от смещения и  $1/30$  высота сечения» [21]. Влияние эксцентриситета и армирования можно увидеть при расчете прочности сечений у сжатых железобетонных элементов, в двух расчетных случаях. При  $\xi \leq \xi_R$  – большие эксцентриситеты, при  $\xi > \xi_R$  – малые эксцентриситеты. Чаще всего, исследования по учету влияния эксцентриситета приложения нагрузки велись для второго случая, малого эксцентриситета.

«Как показывают опыты, высота сжатой зоны бетона  $x$  существенно зависит от величины эксцентриситета приложения продольных сил  $e_0$ , что не учитывается при использовании уравнения равновесия продольных сил и внутренних усилий, как предлагается в нормативных документах. Особенно опасным фактором является неточность монтажа внецентренно сжатых элементов в производственных условиях, что приводит к увеличению эксцентриситета продольных сил, а соответственно и снижению их несущей способности, а иногда и к разрушению элементов» [19].

«В действующих нормативных документах высота сжатой зоны бетона  $x$ , в предельном состоянии элемента, определяется из уравнения равновесия продольных сил и внутренних усилий, где значение  $N$  есть фактически приложенная нагрузка, однако, эпюра напряжений в бетоне сжатой зоны при этом принимается прямоугольной, напряжение в бетоне принимается равным его предельному значению  $R_b$ , что соответствует значению  $N_{max}$ . При изменении нагрузки от  $N$  до  $N_{max}$  вид (очертание) и площадь эпюры

напряжений, а также высота сжатой зоны бетона могут существенно изменяться. Отсюда следует, что для проверки условия  $N \leq N_{сеч}$  или  $M \leq M_{сеч}$  высоту сжатой зоны бетона  $x$  необходимо определять в зависимости от  $N_{сеч} = N_{max}$ , а не в зависимости от фактически приложенной нагрузки  $N$ , как приводится в нормативных документах» [19].

Проанализировав все выбранные источники, можно сделать вывод, что тема усиления железобетонных колон являлась и является актуальной в настоящий момент, но, к сожалению, при совершенствовании способов усиления, при разработке и применении новых материалов для усиления строительных конструкций, нормативная база развивается медленнее, чем происходит обновление способов и материалов усиления. Это еще раз подтверждает необходимость проведения исследований в выбранной теме, усовершенствовании и внедрения новых методик расчетов, выведение численного эффекта обоймы.

Основные требования к расчету усиленных конструкций приведены в СП 349.1325800.2017.

### **1.3 Применяемые материалы при усилении**

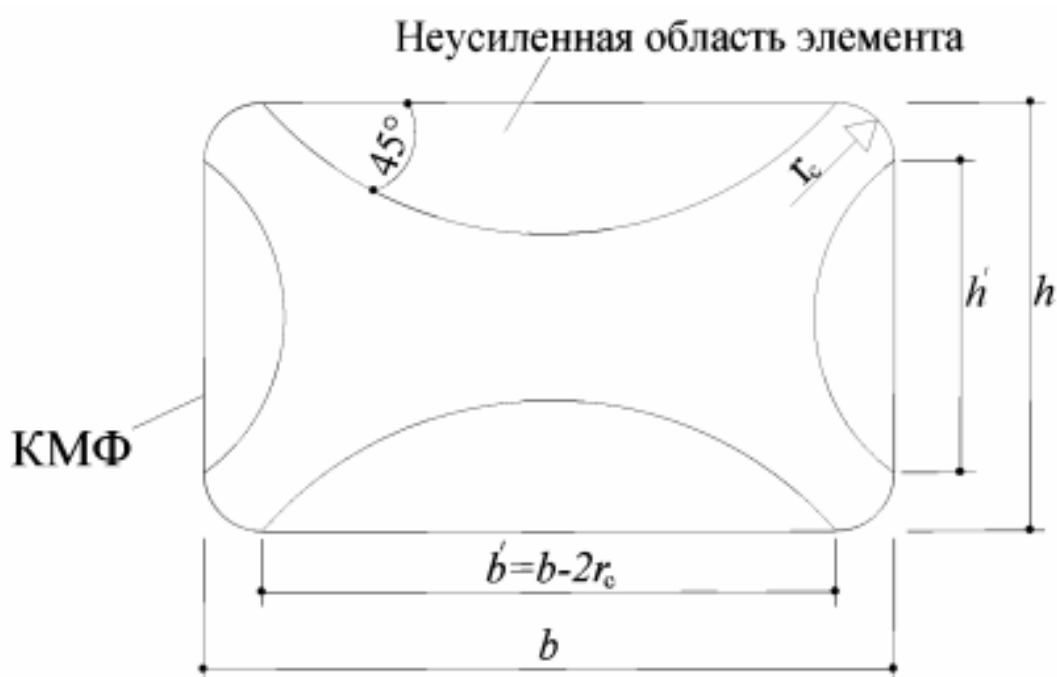
«Все материалы, используемые для ремонта, должны быть максимально совместимы с основанием по физико-механическим, химическим, электрохимическим и размерным свойствам» [10].

«Материалы, применяемые для усиления или восстановления железобетонных конструкций, должны соответствовать требованиям действующих нормативных документов, иметь сопроводительную документацию, подтверждающую их соответствие нормативным требованиям, включая паспорта качества и (или) протоколы испытаний, и должны подвергаться входному контролю по ГОСТ 24297» [25].

Для усиления конструкций могут применяться различные материалы. К примеру, может увеличиваться площадь сечения за счет обетонирования

конструкции, либо может добавляться армирование, в виде наращивания арматуры, монтажа дополнительных стальных элементов. Существуют также углеродные однонаправленные ленты, углеродные стеки, углепластиковые ламели для усиления, усиление железобетонных колонн стекловолокном, другими композитными материалами.

Новым материалом для усиления являются композиционные материалы. Существуют разные типы композитов. Например, появились углепластиковые панели, слоистые материалы, текстолиты, стеклопластики. Усиление композиционным материалом представлено на рисунке 4. Все они обладают высокими эксплуатационными характеристиками. Все композиционные материалы состоят из матрицы и армирующего вещества. Например, стеклопластики армируются стеклянными волокнами, в качестве формирующей матрицы при их изготовлении применяют особые синтетические смолы/термопластичные виды полимеров. А текстолиты — это уже слоистые материалы, армированные тканями на основе различных волокон. Заготовки полотна заранее пропитаны смолой, а затем спрессованы при высоких температурах. Основным недостатком композиционных материалов является высокая стоимость, а также из чего вытекает низкая ремонтпригодность, что повышает стоимость их эксплуатации.

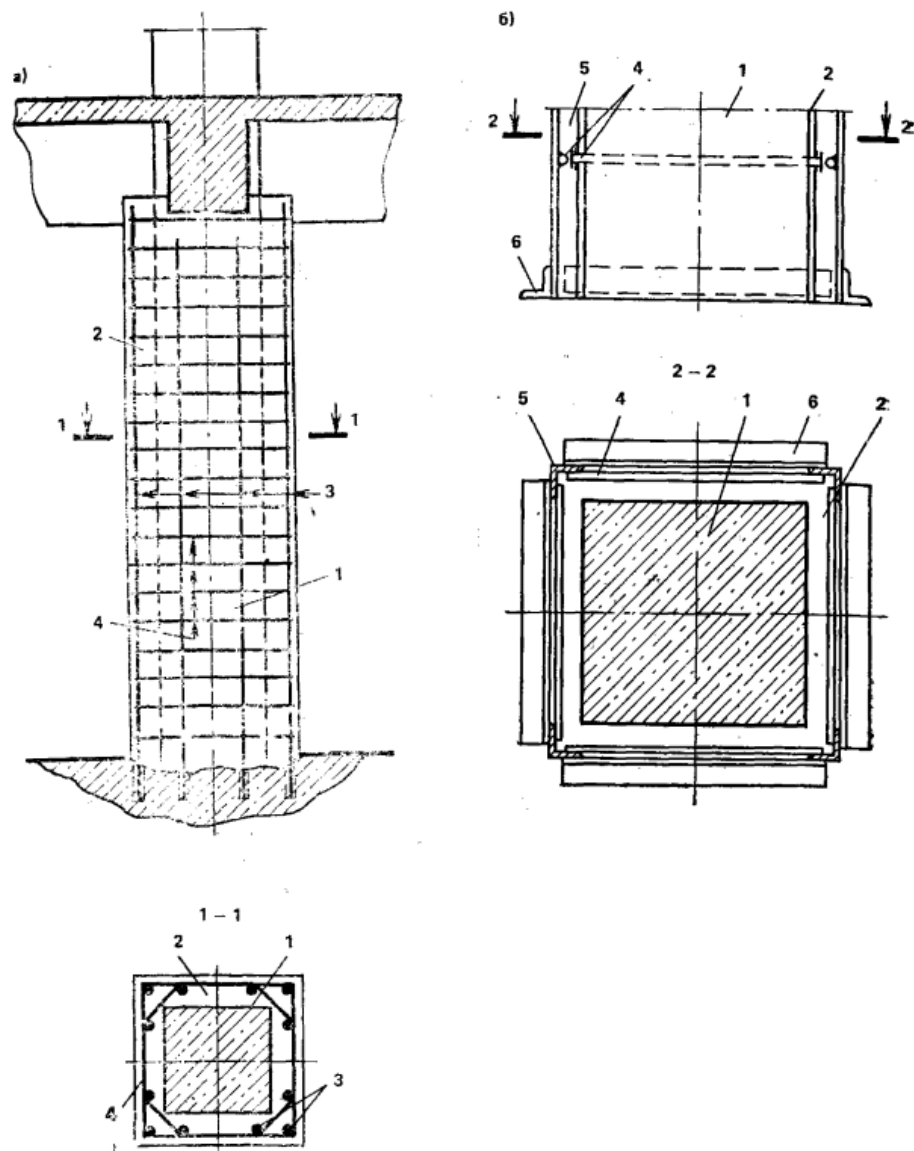


$b$  и  $h$  – размеры сторон прямоугольной колонны;  $b'$  и  $h'$  – размеры частей колонн, не охваченных усилением

Рисунок 4 – Эффективная область усиления обоймами из КМФ  
прямоугольных железобетонных колонн [13]

Сущность метода усиления в виде наращивания состоит в увеличении площади сечения по высоте или ширине и представлена на рисунке 5. Наращивание конструкции было предложено к.т.н. Литвиновым И.М. и опубликовано в 1942 году.

Даже несмотря на появление огромного количества совершенно новых, инновационных материалов бетон является одним из основных материалов на строительной площадке. Бетон представляет собой искусственный строительный камень, изготовленный из вяжущего вещества, воды и разных добавок, с помощью которых можно поменять свойства бетонной массы. Состав бетонной смеси может изменяться, в соответствии с производственной необходимостью. С развитием научно-технического прогресса развиваются и виды бетона, появляются новые добавки. К примеру, чтобы получить сталебетон, в бетонную смесь вводят стальные опилки. Качество бетона регламентирует ГОСТ 26633-2015.



а – со стержневой арматурой; б – с жесткой наружной арматурой из уголков;  
 1 – усиливаемая колонна; 2 – обойма; 3 – продольная арматура; 4 – поперечная арматура обоймы; 5 – жесткая продольная арматура обоймы; 6 – опорные уголки жесткой обоймы

Рисунок 5 – Усиление колонны железобетонной обоймой [17]

Но как отмечено ранее в данной работе, усиление стальными элементами является наиболее распространенным и сравнительно простым в монтаже, данное усиление представлено на рисунке б.

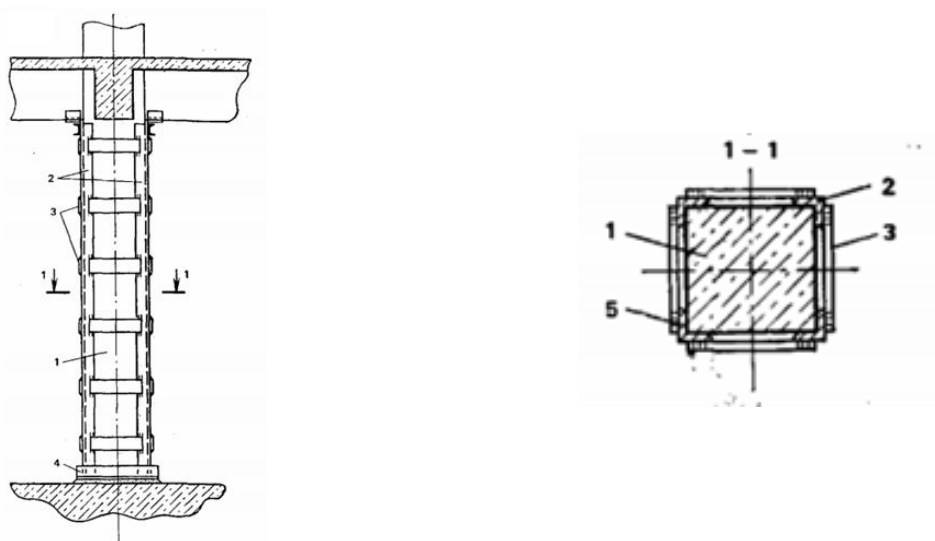
К основным преимуществам усиления именно стальными элементами можно отнести конструкционную гибкость схемы крепления. После

завершения установки каркаса конструкция включается в работу, готова к принятию дополнительных нагрузок, а при дальнейшей эксплуатации каркас можно будет модифицировать, внося дополнительные элементы крепежа.

При устройстве металлических обойм одно из обязательных условий – это плотное примыкание металлических элементов к граням усиливаемой колонны и их вертикальность.

Также при устройстве металлической обоймы может применяться предварительное напряжение усиливаемых элементов. Для этого металлические накладки по углам изготавливают немного длиннее нужного расстояния между верхними и нижними упорами. После этого их стягивают с помощью болтов, чем достигают нужное предварительное напряжение конструкции, работающей на сжатие.

В стальной обойме из уголков, которые устанавливаются по граням колонны – составной по высоте, предусматривают опорные элементы с гайками на концах стыкуемых элементов обоймы, через них пропускают натяжной винт с разносторонней резьбой по концам. По эстетической составляющей, каркас и все болты закрывают дополнительной обшивкой или красят.



1 – усиливаемая колонна; 2 – стойки-уголки; 3 – соединительные планки; 4 – подкладки; 5 – зачеканка цементным раствором



## Рисунок 6 – Усиление колонны металлической обоймой [17]

Технико-экономический эффект от применения данного метода заключается в быстром достижении надежного предварительного напряжения элементов усиления железобетонной колонны.

### **Выводы по первой главе**

В первой главе проведен анализ значения реконструкции, а также усиления конструкций, в строительной отрасли, приведена актуальность темы усиления в настоящие дни, описано какие могут применяться материалы, виды при усилении строительных конструкций. Данный анализ показал, что метод усиления железобетонных колонн металлической обоймой является одним из распространенных, но не до конца изученных.

Благодаря литературному обзору подтверждена актуальность выбранной тематики, проведено сравнение различных методов усиления. Недостаточность разработки нормативной базы в сфере усиления железобетонных конструкций стальными элементами способствует проведению эксперимента, для численной оценки эффекта обоймы на основе испытаний опытных образцов при сжатии.

## **Глава 2 Программа экспериментальных исследований**

В рамках магистерской диссертации предусмотрено проведение испытаний для проведения сравнительного анализа теоретических и экспериментальных значений, выявления численных значений эффекта обоймы, уточнения влияния эксцентриситета приложения нагрузки на эффект обоймы.

Основанием для проведения эксперимента является подтверждение полученных теоретических зависимостей. Для этого необходимо было установить экспериментальным путем характер разрушения металлической обоймы, совместность работы бетонной конструкции и обоймы, получение экспериментальных значений деформаций, влияние эксцентриситета приложения нагрузки на эффект обоймы, получение диаграмм «деформация – нагрузка».

### **2.1 Расчет и проектирование модели усиливаемых образцов**

Для расчета и подбора подходящего способа усиления рассматривались колонны типового размера. Размер колонны принимался, исходя из распространённых конструктивных решений, часто применяющихся в строительстве жилых домов, промышленных сооружений и зданий.

Был выбран размер колонны  $400 \times 400$  мм, для сравнения с экспериментальной бетонной призмой, размером  $150 \times 150$  мм.

Для того чтобы провести усиление стальной обоймой экспериментальной призмы, пропорционально типовой колонне, были составлены сравнительные таблицы по усилению типовой колонны  $400 \times 400$  мм, представленные в таблице 1 и по усилению экспериментальной призмы  $150 \times 150$  мм, представленной в таблице 2.

Таблица 1 – Подбор усиления колонны 400×400 мм стальными элементами

| Колонна сечением 400×400 мм |      |       |       |           |           |         |         |
|-----------------------------|------|-------|-------|-----------|-----------|---------|---------|
|                             | 4Ø16 | 4Ø20  | 4Ø25  | 4L 100×10 | 4L 125×10 | 4L 75×9 | 4L 75×5 |
| $A_{арм}, см^2$             | 8,04 | 12,56 | 19,64 | 76,96     | 97,32     | 51,32   | 29,56   |
| $S_{сеч}, см^2$             | 1600 | 1600  | 1600  | 1600      | 1600      | 1600    | 1600    |
| Процент армирования         | 0,50 | 0,79  | 1,23  | 4,81      | 6,08      | 3,21    | 1,85    |

Для колонны сечением 400×400 мм принимаются пластины толщиной 10 мм, шириной, определенной по формуле:

$$b_{пл} = (0,5 \dots 0,75) \cdot b = 0,75 \cdot 400 = 300 \text{ мм} \quad (1)$$

высотой, рассчитанной по формуле:

$$h_{пл} = (10 \dots 15) \cdot \delta_{пл} = 15 \cdot 10 = 150 \text{ мм} \quad (2)$$

расположенных с шагом в 400 мм.

Процент армирования планками рассчитывается по формуле:

$$\mu = \frac{2A_{sw}(h+b)}{hbs} 100 = \frac{2 \cdot 15(40+40)}{40 \cdot 40 \cdot 40} = 3,7 \quad (3)$$

На рисунке 7 представлена модель колонны 400×400 мм, усиленной стальными элементами.

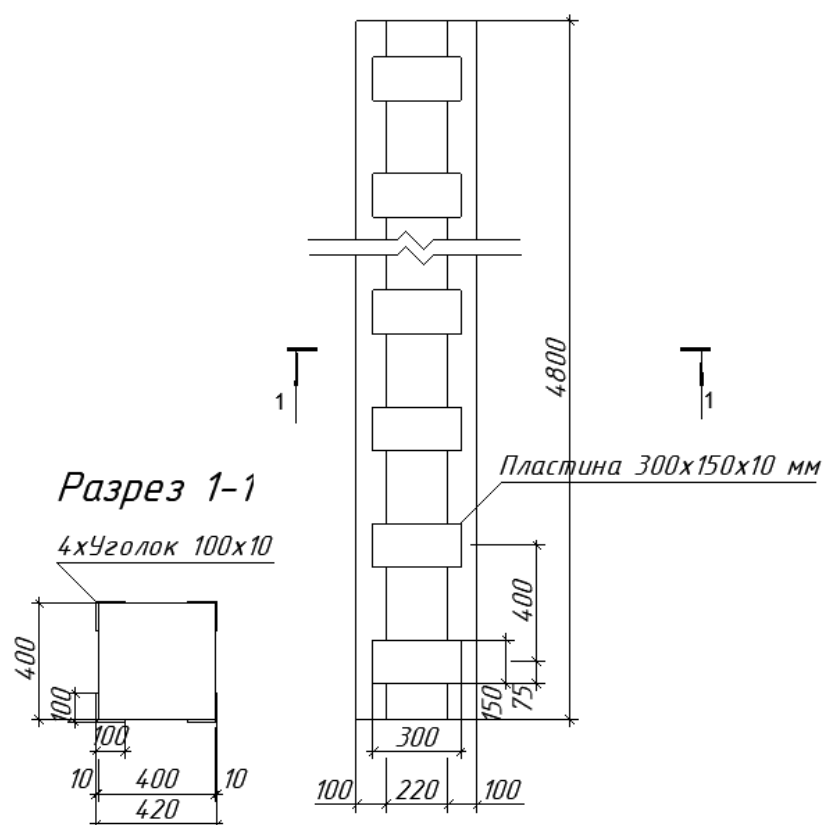


Рисунок 7 – Усиление типовой колонны стальной обоймой

Для колонны сечением 150×150 мм исключаем арматурный каркас, для того, чтобы при проведении эксперимента учитывать только влияние эффекта обоймы на бетон.

Таблица 2 – Подбор усиления колонны 150×150 мм стальными элементами

| Колонна сечением 150×150 мм |         |         |         |         |
|-----------------------------|---------|---------|---------|---------|
|                             | 4L 40×4 | 4L 35×3 | 4L 25×4 | 4L 20×3 |
| $A_{арм}, см^2$             | 12,32   | 8,16    | 7,44    | 4,52    |
| $S_{сеч}, см^2$             | 225     | 225     | 225     | 225     |
| Процент армирования         | 5,48    | 3,63    | 3,31    | 2,01    |

Для колонны сечением 150×150 мм принимаются пластины толщиной 4 мм, шириной  $b_{пл}=150$  мм, высотой  $h_{пл}=60$  мм, расположенные с шагом в 150 мм.

Процент армирования планками рассчитывается по формуле:

$$\mu = \frac{2A_{sw}(h+b)}{hbs} 100 = \frac{2 \cdot 2,4(15+15)}{15 \cdot 15 \cdot 15} = 4,3 \quad (4)$$

По сравнению с процентом армирования колонны размером 400×400 мм, где были приняты 4 уголка, размером 100 на 10 мм, с процентом армирования 4,81, ближе всего, для призмы размером 150×150 мм, подходит 4 уголка, размером 40 на 4 мм, с процентом армирования 5,48. В соответствии с полученными значениями запроектирована следующая модель призмы, для проведения эксперимента (см. рис. 8).

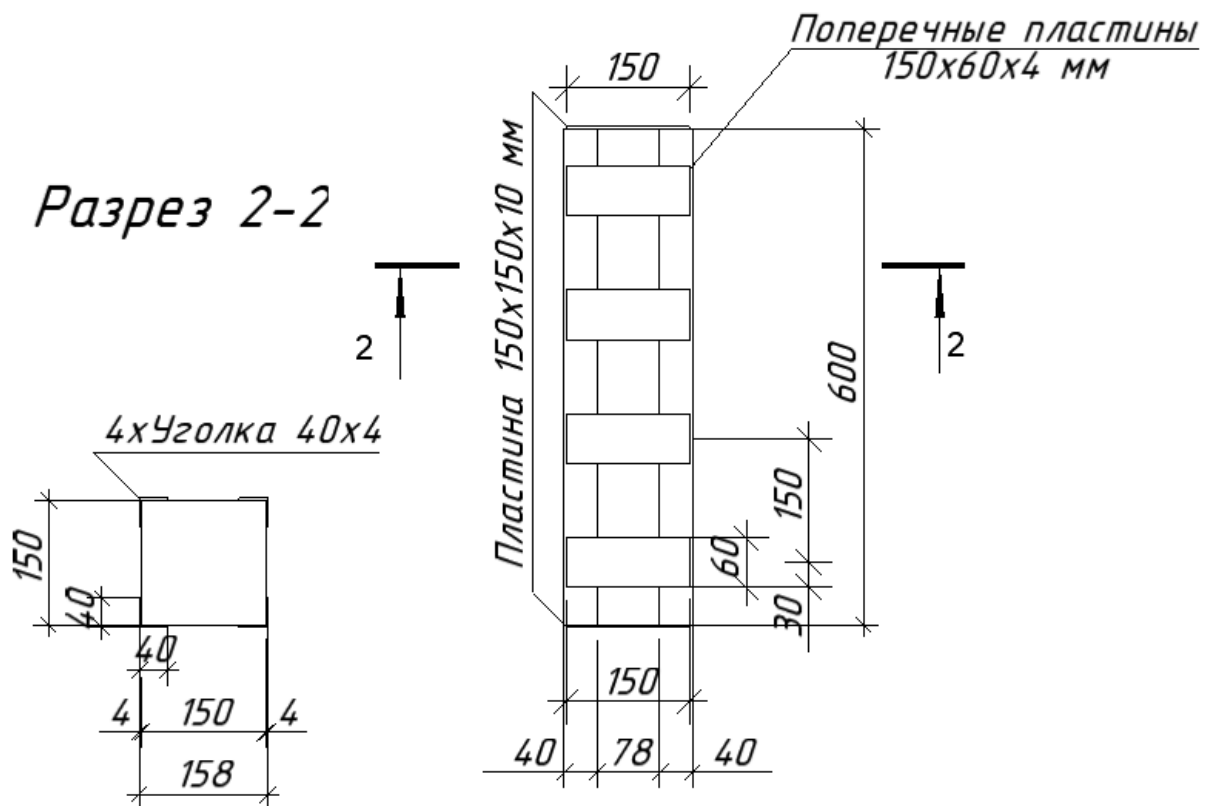


Рисунок 8 – Усиление экспериментальной призмы стальной обоймой

Для включения стальных элементов усиления в работу предусмотрены 2 пластины по торцам призмы, размером 150×150×10 мм.

## **2.2 Характеристика и изготовление партии образцов**

Бетонирование опытных образцов (кубов и призм) производилось на заводе АО «ТзЖБИ им. В.К. Макарова». Для чистоты эксперимента бетонирование кубов и призм производилось из одной бетонной смеси. Набор прочности происходил на заводе, в условиях нормального температурно-влажностного режима. Формы под бетонирование были выбраны металлические ФК-150 (150×150×150 мм) для куба и металлические ФП-150 (150×150×600 мм) и из фанеры (150×150×600 мм) для призм.

Схема усиления, в соответствии с расчетом, была принята из вертикальных уголков и поперечных пластин, с устройством предварительного напряжения поперечных планок.

Для экспериментальной призмы сечением 150×150 мм предусмотрен уголок 4L 40×4 мм, пластины толщиной 4 мм, шириной 150 мм, высотой 60 мм, расположенные с шагом в 150 мм (см. рис. 8). Для включения в работу и обеспечения целостности конструкции усиления были запроектированы торцевые пластины 150×150×10 мм, с устройством анкеровки на 50 мм в бетон (см. рис. 9).



Рисунок 9 – Пример устанавливаемой торцевой пластины

Формы металлические обрабатывались маслом, для упрощения процесса распалубливания. Бетонирование производилось вручную бетоном заводского изготовления, класса В35 (см. рис. 10).



Рисунок 10 – Экспериментальные призмы с бетонными кубиками

Для предотвращения растрескивания бетона, все конструкции были закрыты укрывной пленкой на время твердения (см. рис. 11). Спустя 28 суток после изготовления опытные образцы были перевезены для устройства усиления стальными элементами.



Рисунок 11 – Защита забетонированных конструкций

Перед монтажом стальных элементов образцы были обработаны шлифовальной бумагой, для устранения неровностей.

Процесс монтажа состоял в следующем:

- монтаж уголков с двух сторон экспериментальной призмы;
- стягивание уголков струбцинами индивидуального изготовления;
- монтаж поперечных пластин в проектное положение;
- создание предварительного напряжения с помощью нагрева строительным феном на 100°C, с учетом температуры в помещении.



- Контроль нагрева был произведен строительным термометром (infrared thermometer  $-50^{\circ}\text{C} - 330^{\circ}\text{C}$ ) (см. рис. 12);
- обварка пластины в местах соприкосновения в нагретом состоянии;
  - по завершению монтажа поперечных пластин приварка продольных уголков к торцевым пластинам.

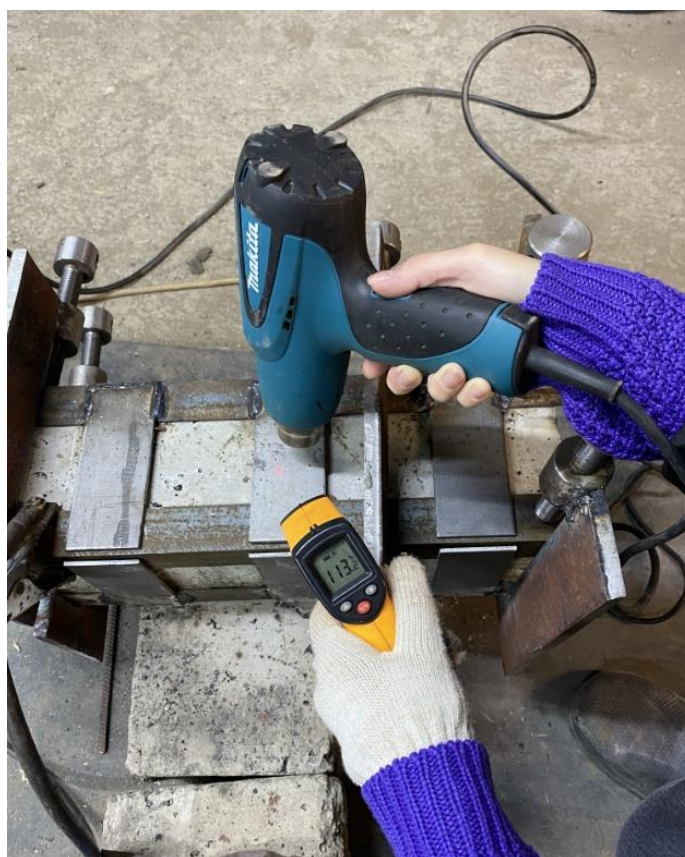


Рисунок 12 – Предварительное напряжение поперечных пластин

После завершения сварочных работ, все швы были шлифованы угловой шлифовальной машиной.

### **2.3 Проведение испытаний**

В проведении эксперимента может быть несколько варьируемых факторов, один из них остается неизменным, чтобы выявить влияние факторов, которые меняются.

Так, например, варьируемые факторы, могут быть следующие:

- площадь поперечного армирования;
- величина эксцентриситета приложения нагрузки;
- класс бетона;
- характер нагружения.

В проводимом эксперименте данной магистерской диссертации варьируемым фактором был выбран характер нагружения, остальные факторы выбраны постоянными.

Опыт проводился на гидравлическом прессе П-250 (см. рис. 13), предназначенном для испытания строительных материалов (бетон, природный и искусственный строительный камень) на сжатие. Пресс работает с помощью торсионного силоизмерителя. Прикладываемая нагрузка отображается на двухдиапазонном циферблате. Контролируется нагрузка с помощью шкалы силоизмерителя, встроенного в систему гидравлического прессы.



Рисунок 13 – Гидравлический пресс П-250

Программой испытаний предусмотрено:

- проведение испытаний на сжатие 3 экспериментальных кубов с приложенной кратковременной нагрузкой, в соответствии с ГОСТ 10180-2012;
- проведение испытаний на сжатие 2 экспериментальных призм, без усиления, с приложенной кратковременной нагрузкой, в соответствии с ГОСТ 24452-80;
- проведение испытаний на сжатие 1 экспериментальной призмы, с усилением стальной обоймой, в виде продольных уголков и поперечных пластин, с приложенной кратковременной нагрузкой, в виде центрального сжатия, в соответствии с ГОСТ 24452-80;
- проведение испытаний на сжатие 1 экспериментальной призмы, с усилением стальной обоймой, в виде продольных уголков и поперечных пластин, с приложенной кратковременной нагрузкой, в виде внецентренного сжатия, в соответствии с ГОСТ 24452-80.

Перед началом эксперимента были проведены подготовительные работы. Контрольные образцы осматривались на наличие дефектов, сколов, при необходимости, удалялись неровности. Были проверены фактические размеры экспериментальных образцов. По факту проверки дефекты и сколы не были обнаружены, неровности были устранены наждачной бумагой. Фактические размеры экспериментальных образцов соответствовали проектируемым.

После проведения подготовительных мероприятий образцы были установлены между плитами пресса, в соответствии с разметкой. Вначале была определена кубиковая прочность по испытанию трех экспериментальных образцов (см. рис. 14).



Рисунок 14 – Разрушение кубов

Вторым этапом были испытаны призмы без усиления. Перед проведением испытаний контрольные образцы также осматривались на наличие дефектов, сколов, при необходимости, удалялись неровности. По факту проверки дефекты и сколы не были обнаружены, неровности были устранены наждачной бумагой.

Фактические размеры экспериментальных образцов составили для призм без усиления  $153 \times 150 \times 596$ ,  $154 \times 150 \times 601$  мм, для призм усилением  $152 \times 151 \times 598$ ,  $151 \times 151 \times 600$  мм.

После проверки фактических размеров был установлен крепеж под датчики, для снятия показаний, на призмы без усиления и с усилением.

На рисунке 15 представлена схема крепежа индивидуального изготовления, под установку Мессур, для призмы с усилением.

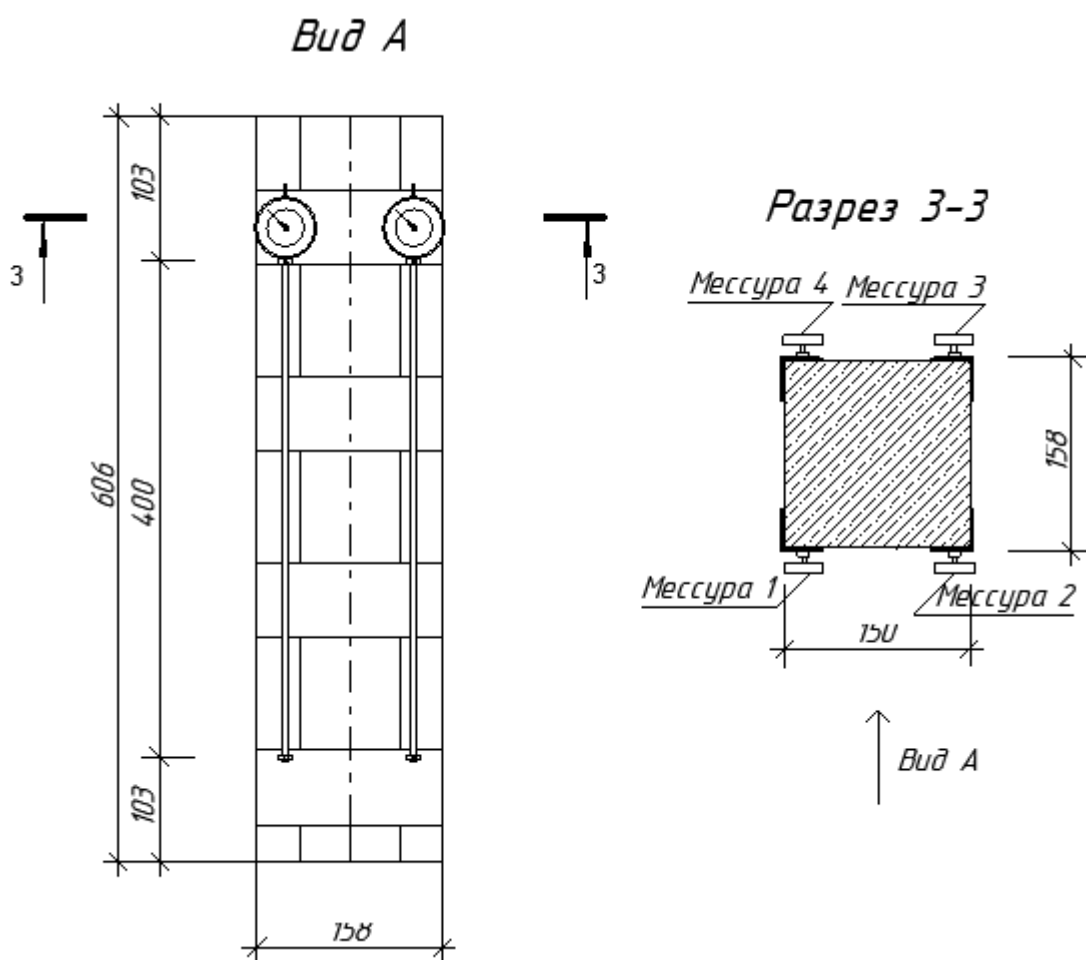


Рисунок 15 – Схема установки датчиков на призме с усилением

На призмах без усиления датчики крепятся на металлические рамки, которые устанавливаются на расстоянии 400 мм между собой, показано на рисунке 16. На призмах с усилением был предусмотрен специальный крепеж под датчики индивидуального изготовления, запроектированный так, чтобы по 2 датчика на одной стороне, могли учитывать распределение нагрузок по двум сторонам призмы. Сам крепеж приваривался к поперечной пластине. База между крепежом под датчики также составляет 400 мм, см. рис. 16.



Рисунок 16 – Установка датчиков на призмах

Для выравнивания призм относительно уровня горизонта была предусмотрена установка экспериментальных образцов на слой быстротвердеющей смеси гипса, укладываемой на верхний и нижний торец призмы.

Для призм без усиления было выбрано центральное приложение нагрузки. Образцы нагружались постепенно, первые 6 шагов каждые 2 минуты с нагрузкой в 5 тонн, последующие шаги, вплоть до разрушения, длились 4 минуты, с нагружением в 5 тонн до 7 шага и нагружением в 7,5 тонн до 15 шага. Получаемые в процессе проведения испытаний показания датчиков заносятся в журнал испытаний. Разрушение призм без усиления показано на рисунке 17.

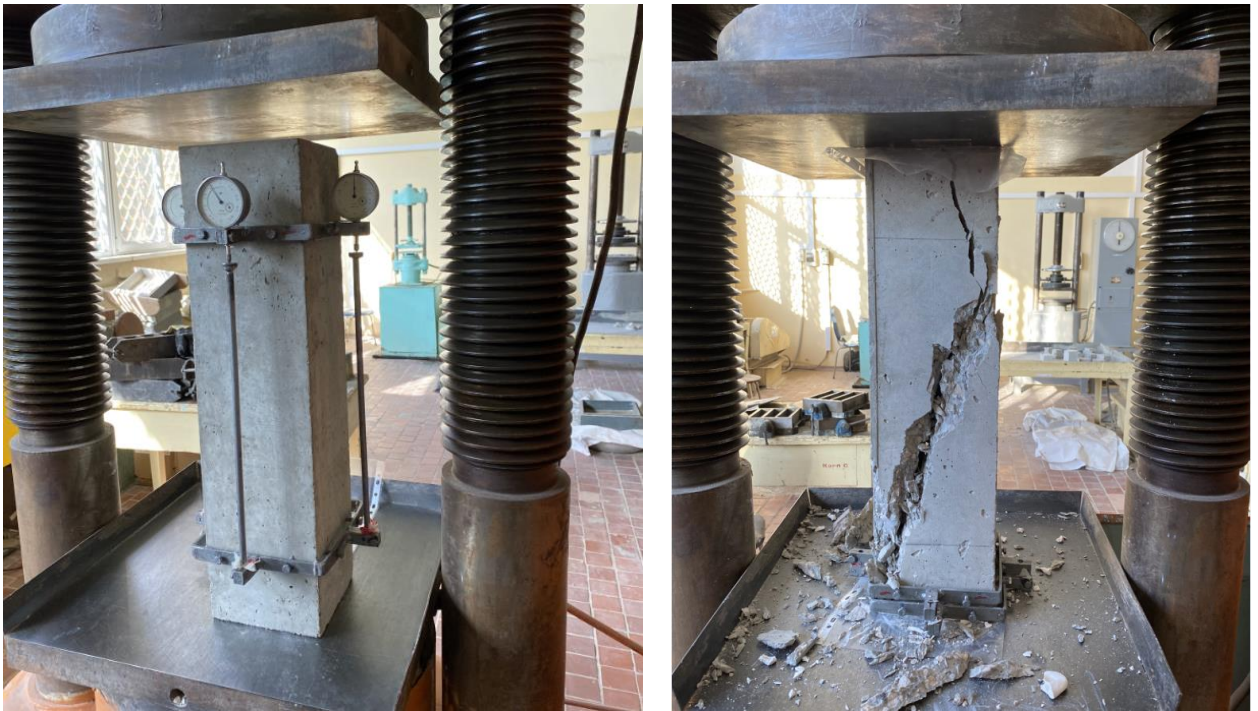


Рисунок 17 – Разрушение призмы без усиления

Третий этап – проведение испытаний на призмах с усилением.

Призмы с усилением также устанавливались на слой быстротвердеющей смеси гипса.

Первая призма с усилением была испытана с центральным приложением нагрузки. Образец нагружался постепенно, первые 6 шагов каждые 2 минуты с нагрузкой в 5 тонн, последующие шаги, вплоть до разрушения, длились 3 минуты, с нагружением в 5 тонн до 7 шага и нагружением в 7,5 тонн до 21 шага.

Все полученные показания датчиков, в процессе испытания, заносились в журнал испытаний. Разрушение первой призмы с усилением представлено на рисунке 18.

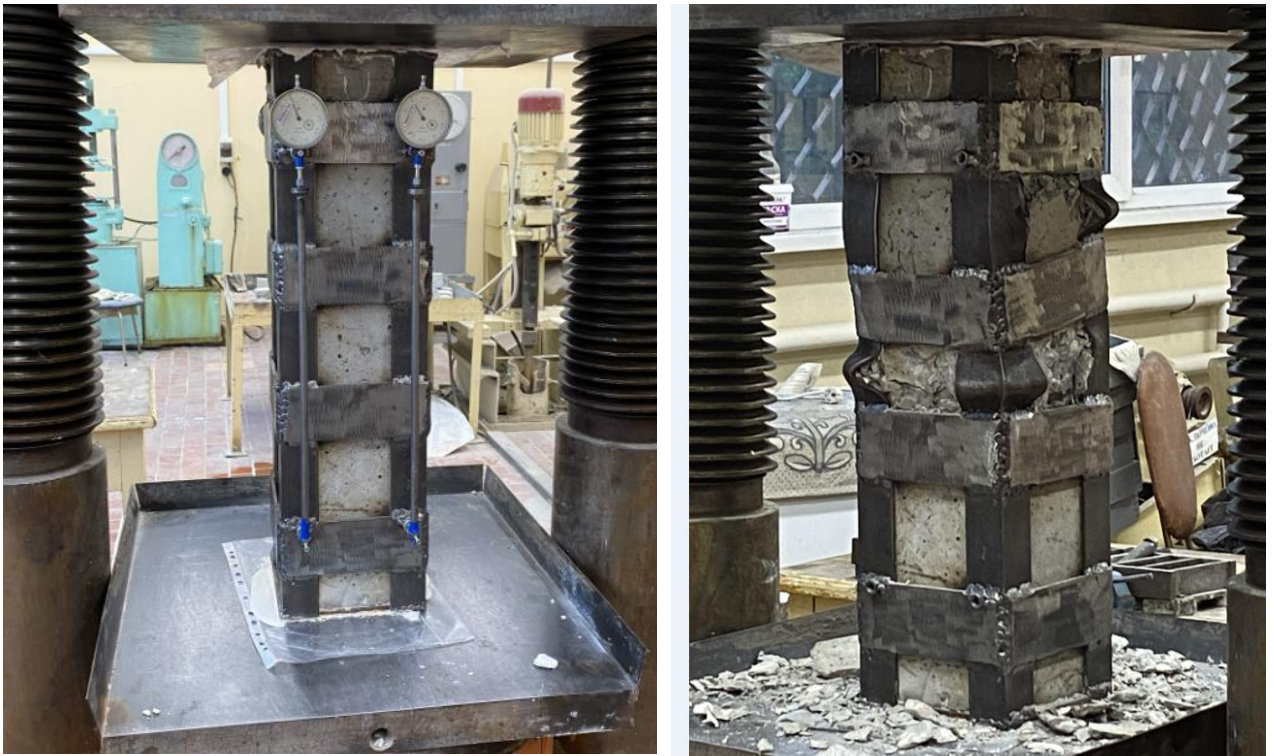


Рисунок 18 – Разрушение призмы с усилением, с центральным приложением нагрузки

Для второй призмы с усилением было выбрано внецентренное приложение нагрузки, с эксцентриситетом 45 мм от центра призмы. На вторую призму, помимо мессур были установлены также тензометры Гугенбергера. Образец нагружался постепенно, первые 6 шагов каждые 2 минуты с нагрузкой в 5 тонн, последующие шаги, вплоть до разрушения, длились 3 минуты, с нагружением в 5 тонн до 7 шага и нагружением в 7,5 тонн до 13 шага. Все показания датчиков были занесены в журнал испытаний. Разрушение второй призмы с усилением показано на рисунке 19.





Рисунок 19 – Разрушение призмы с усилением, с внецентренным приложением нагрузки

С помощью проведения экспериментов были получены такие значения, как:

- величина прикладываемой нагрузки, в тоннах;
- период времени приложенного усилия, в минутах;
- значения приращений с мессур, для подсчета относительных деформаций;
- значения приращений с тензметров Гугенбергера в четырех точках исследуемого объекта.

Благодаря полученным значениям получилось вычислить кубиковую и призмную прочность, зависимость деформаций от наличия/отсутствия эффекта обоймы, зависимость деформаций между призмами в одинаковых условиях.

## **Выводы по второй главе**

Во второй главе было выполнено:

- был разработан и представлен подробный метод проведения эксперимента;
- подготовлены расчеты, схемы экспериментальных образцов;
- изготовлены опытные образцы для проведения испытаний (3 куба, 2 призмы без усиления, 2 призмы с усилением), проведены подготовительные работы (подготовлена смесь для выравнивания, проведена маркировка, установлены приборы измерения и крепления, разработаны протоколы эксперимента);
- пройден инструктаж по технике безопасности;
- проведен запланированный эксперимент по всем запроектированным образцам с внесением полученных данных в протоколы испытаний.

## Глава 3 Обработка результатов испытаний, сравнительный анализ

Для получения теоретических значений была разработана нелинейная деформационная модель, с учетом характеристик выбранных материалов.

В данной главе представлены теоретические данные, полученные с деформационной модели и полученные экспериментальные значения, для проведения анализа.

Благодаря выполненному сравнению удалось сделать выводы о работе эффекта обоймы, получить численные значения эффекта обоймы, что позволит использовать полученные результаты в усовершенствовании нормативной базы.

### 3.1 Обработка полученных результатов экспериментальных исследований

По испытанию трех экспериментальных образцов была определена кубиковая прочность (см. табл. 3). В соответствии с нормативными документами, кубиковая прочность есть среднее по результатам двух образцов с наибольшей нагрузкой.

Кубиковая прочность бетона определяется по следующей формуле:

$$R_{k1} = \alpha \frac{P}{A} = 1 \cdot \frac{115750}{225} = 514,44 \text{ кг/см}^2, \quad (5)$$

где  $\alpha$  – масштабный коэффициент, который зависит от размера кубика ( $\alpha=1$  при  $\alpha=150$  мм).

$$R_{k2} = \alpha \frac{P}{A} = 1 \cdot \frac{113000}{225} = 502,22 \text{ кг/см}^2, \quad (6)$$

$$R_{k3} = \alpha \frac{P}{A} = 1 \cdot \frac{110000}{225} = 488,89 \text{ кг/см}^2, \quad (7)$$

Таблица 3 – Расчет кубиковой прочности

| №<br>испытуемого<br>образца | Разрушающая<br>нагрузка $P_p$ , кг | Прочность бетона<br>$R$ , кг/см <sup>2</sup> | Кубиковая<br>прочность $R_k$ , МПа |
|-----------------------------|------------------------------------|--|------------------------------------|
| 1                           | 115 750,00                         | 514,44                                       | 51,44                              |
| 2                           | 113 000,00                         | 502,22                                       | 50,22                              |
| 3                           | 110 000,00                         | 488,89                                       | 48,89                              |
|                             |                                    | <b><math>R_{k,ср}</math>, МПа</b>            | <b>50,8</b>                        |

По прочности бетона с испытаний кубов можно сделать вывод, что бетон соответствует ближайшему классу В35.

После проведения испытаний бетонных кубов были испытаны призмы, без усиления. По испытанию призм была установлена следующая призмная прочность, представлено в таблице 4.

Призмная прочность рассчитывается по следующей формуле:

$$R_{пр1} = \frac{P_p}{F} = \frac{894856,81}{22500} = 39,77 \text{ МПа}, \quad (8)$$

$$R_{пр2} = \frac{P_p}{F} = \frac{980665,00}{22500} = 43,59 \text{ МПа} \quad (9)$$

Начальный модуль упругости был вычислен для каждого образца, с учетом нагрузки, составляющей 30 процентов от разрушающей, по следующей формуле:

$$E_{\sigma1} = \frac{\sigma_1}{\varepsilon_{1y}} = \frac{11,93}{0,0003328} = 35\,852 \text{ МПа}, \quad (10)$$

$$\text{где } \sigma_1 = \frac{P_p}{F} = \frac{894856,81 \cdot 0,3}{22500} = 11,93 \text{ МПа}.$$

$$E_{\sigma_2} = \frac{\sigma_2}{\varepsilon_{2y}} = \frac{13,08}{0,0003857} = 33\,901 \text{ МПа}, \quad (11)$$

$$\text{где } \sigma_2 = \frac{P_p}{F} = \frac{980665 \cdot 0,3}{22500} = 13,08 \text{ МПа}.$$

Таблица 4 – Расчет призмной прочности и начального модуля упругости

| №<br>испытываемого<br>образца | Разрушающая<br>нагрузка<br>$P_p$ , Н | Площадь<br>сечения<br>$F_{\text{полн}}$ ,<br>$\text{мм}^2$ | Призмная<br>прочность<br>$R_{\text{пр}}$ , МПа | Начальный<br>модуль<br>упругости<br>$E_{b, \text{экс}}$ ,<br>МПа | Нормативный<br>начальный<br>модуль<br>упругости<br>$E_b$ , МПа [3] |
|-------------------------------|--------------------------------------|--|--|--|--|
| 1 (б.у.)                      | 894 856,81                           | 22500  | 39,77  | 35 847   | 34500  |
| 2 (б.у.)                      | 980 665,00                           |  | 43,59  | 33 901   |  |
|                               | Средние значения:                    |  | 41,7   | 34 800   |  |

В протоколах испытаний рассчитывались значения деформаций и напряжений по следующим формулам:

$$\varepsilon_1 = \Delta l_1 / l_1, \quad (12)$$

$$\varepsilon_2 = \Delta l_2 / l_2, \quad (13)$$

где  $\Delta l_1, \Delta l_2$  – абсолютные приращения продольной и поперечной деформации образца, вызванные соответствующим приращением напряжений;

$l_1, l_2$  – фиксированные базы измерения продольной и поперечной деформации образца.

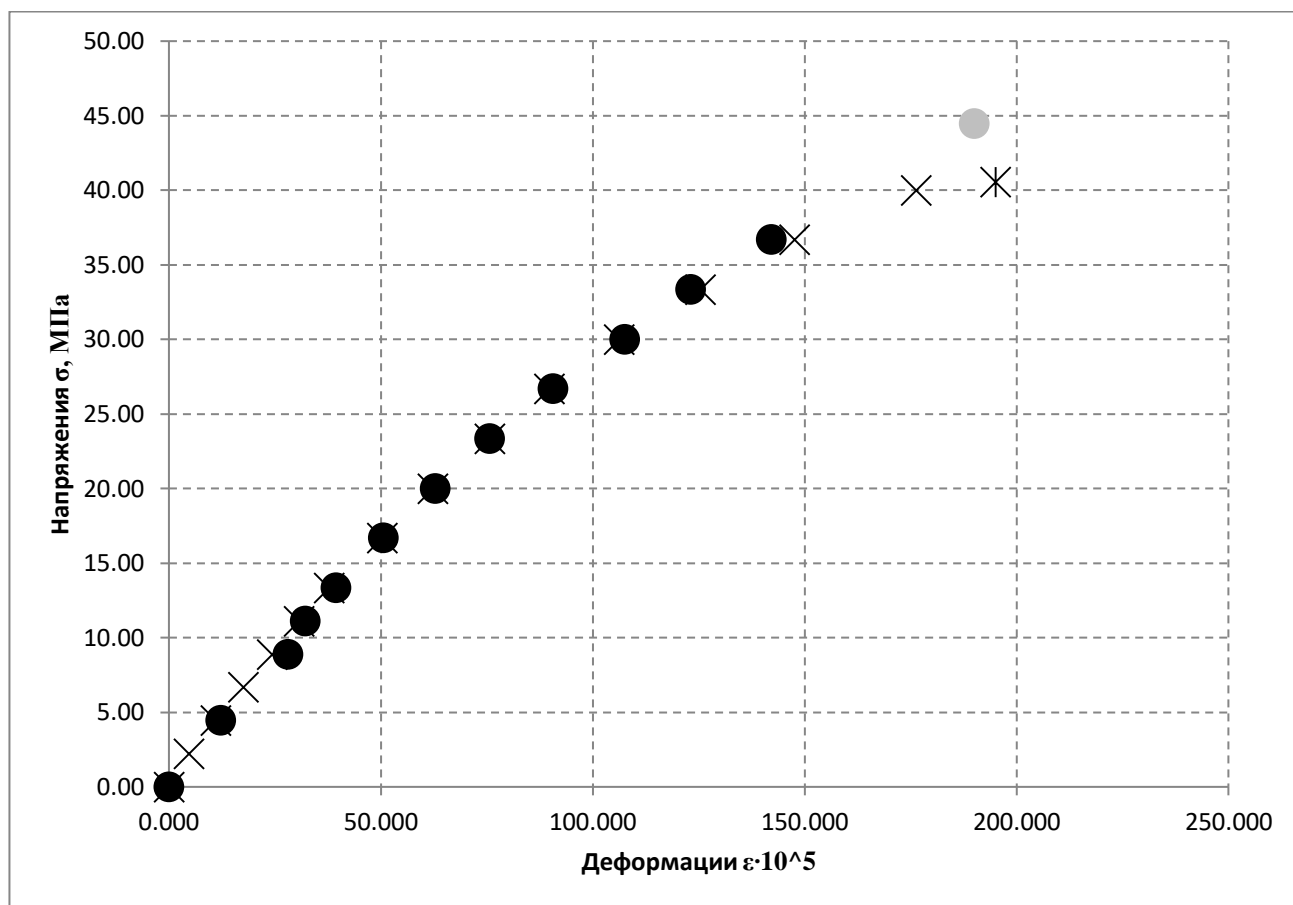
$$\sigma = N/A, \quad (14)$$

Полученные значения напряжений и деформаций можно представить в виде таблиц, для первой и второй призмы без усиления соответственно (см. табл. 5).

Таблица 5 – Значения деформаций и напряжений для неусиленных призм

| Первая призма, без усиления                  |                                  | Вторая призма, без усиления                  |                                  |
|--|----------------------------------|--|----------------------------------|
| Деформации<br>$\varepsilon_{ср1} \cdot 10^5$ | Напряжения,<br>МПа<br>$\sigma_1$ | Деформации<br>$\varepsilon_{ср2} \cdot 10^5$ | Напряжения,<br>МПа<br>$\sigma_2$ |
| 0,000  | 0,00                             | 0,000  | 0,00                             |
| -4,688                                       | 2,22                             | -  | -                                |
| -10,938                                      | 4,44                             | -12,188                                      | 4,44                             |
| -17,500                                      | 6,67                             | -  | -                                |
| -24,375                                      | 8,89                             | -28,125                                      | 8,89                             |
| -30,625                                      | 11,11                            | -32,188                                      | 11,11                            |
| -37,813                                      | 13,33                            | -39,375                                      | 13,33                            |
| -50,313                                      | 16,67                            | -50,625                                      | 16,67                            |
| -62,188                                      | 20,00                            | -62,813                                      | 20,00                            |
| -75,625                                      | 23,33                            | -75,625                                      | 23,33                            |
| -89,688                                      | 26,67                            | -90,625                                      | 26,67                            |
| -106,250                                     | 30,00                            | -107,500                                     | 30,00                            |
| -125,313                                     | 33,33                            | -123,125                                     | 33,33                            |
| -147,500                                     | 36,67                            | -142,188                                     | 36,67                            |
| -176,250                                     | 40,00                            | -  | 40,00                            |

По табличным значениям получаются следующие графики (см. рис. 20).



- – экспериментальные данные первой призмы без усиления; х – экспериментальные данные второй призмы без усиления

Рисунок 20 – Разрушение первой и второй призмы без усиления

На графике видно упругопластические свойства бетона. При увеличении нагрузки – деформации увеличиваются.

После проведения испытаний на призмах, без усиления были испытаны призмы с усилением.

Полученные значения усилий и деформаций можно представить в виде таблиц, для третьей и четвертой призмы с усилением соответственно. Для уточнения распределения деформаций по уголкам и бетону была

предусмотрена установка тензометров на 2 грани призмы с внецентренной нагрузкой (в сжатую и растянутую зону), показано в таблице 6.

Таблица 6 – Значения деформаций и напряжений для усиленных призм

| Третья призма, с усилением                      |                         | Четвертая призма, с усилением                                |          |   |          |                         |
|---|-------------------------|--|----------|---|----------|-------------------------|
| Деформации<br>$\varepsilon_{ср3} \cdot 10^{-5}$ | Усилия, Н<br>$\sigma_3$ | Деформации сжатой<br>зоны $\varepsilon_{ср4, сж} \cdot 10^5$ |          | Деформации<br>растянутой зоны<br>$\varepsilon_{ср4, раст} \cdot 10^5$ |          | Усилия, Н<br>$\sigma_4$ |
|   |                         | Мессуры  | Тензомер | Мессуры   | Тензомер |                         |
| 1   | 2                       | 3  | 4        | 5   | 6        | 7                       |
| -0,000  | 0,00                    | 0,000  | 0,000    | 0,000   | 0,000    | 0,00                    |
| -9,688  | 10,00                   | -11,250  | -6,500   | 3,750   | 1,000    | 10,00                   |
| -15,000   | 15,00                   | -26,875  | -17,500  | 8,125   | 1,500    | 15,00                   |
| -20,313   | 20,00                   | -41,250  | -27,500  | 13,125  | 1,500    | 20,00                   |
| -25,000   | 25,00                   | -54,375  | -38,000  | 18,125  | 2,000    | 25,00                   |
| -29,063   | 30,00                   | -67,500  | -49,000  | 22,500  | 2,500    | 30,00                   |
| -38,125   | 37,50                   | -82,500  | -62,000  | 28,125  | 3,500    | 37,50                   |
| -45,938   | 45,00                   | -108,750   | -82,000  | 40,625  | 5,500    | 45,00                   |
| -55,000   | 52,50                   | -131,875   | -101,500 | 51,250  | 8,000    | 52,50                   |
| -62,813   | 60,00                   | -165,000   | -127,000 | 72,500  | 11,000   | 60,00                   |
| -72,188   | 67,50                   | -207,500   | -153,000 | 96,250  | 15,000   | 67,50                   |
| -80,313   | 75,00                   | -258,750   | -188,000 | 114,375   | 19,000   | 75,00                   |
| -91,563   | 82,50                   | -338,750   |          | 142,500   | 26,000   | 80,00                   |
| -103,125  | 90,00                   | -436,250   |          | 177,500   | 30,000   |                         |



Продолжение таблицы 6

| 1        | 2      | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
|----------|--------|---|---|---|---|---|
| -114,375 | 97,50  |   |   |   |   |   |
| -124,375 | 105,00 |   |   |   |   |   |
| -140,000 | 112,50 |   |   |   |   |   |
| -153,750 | 120,00 |   |   |   |   |   |
| -174,375 | 128,50 |   |   |   |   |   |
| -195,313 | 136,00 |   |   |   |   |   |
| -211,563 | 142,50 |   |   |   |   |   |
| -235,625 | 150,00 |   |   |   |   |   |

По табличным значениям получаются следующие графики (см. рис. 21, рис. 22 и рис. 23).

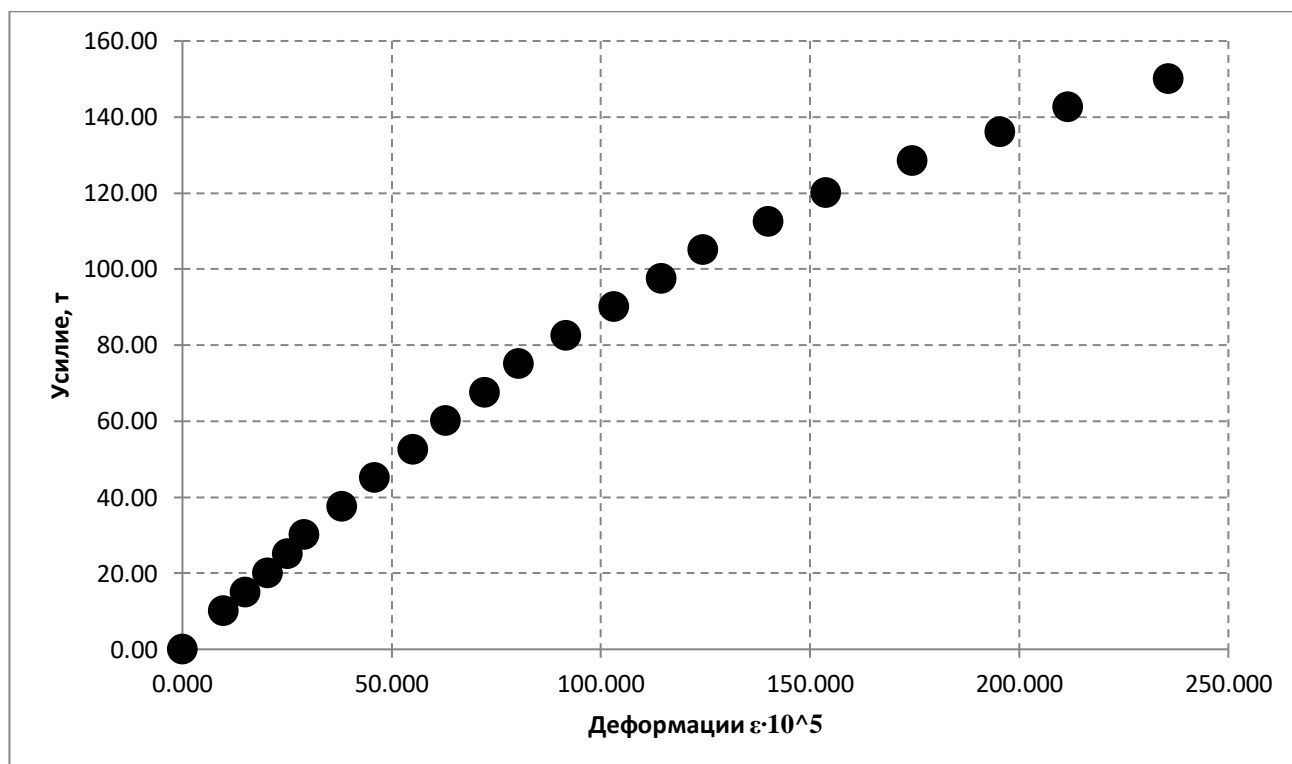


Рисунок 21 – Разрушение третьей призмы с усилением, при центральном нагружении

При испытании призмы с усилением видно увеличение несущей способности, по сравнению с призмой без усиления. Конструкция выдержала большую нагрузку, при этом деформируясь меньше на равных нагрузках.

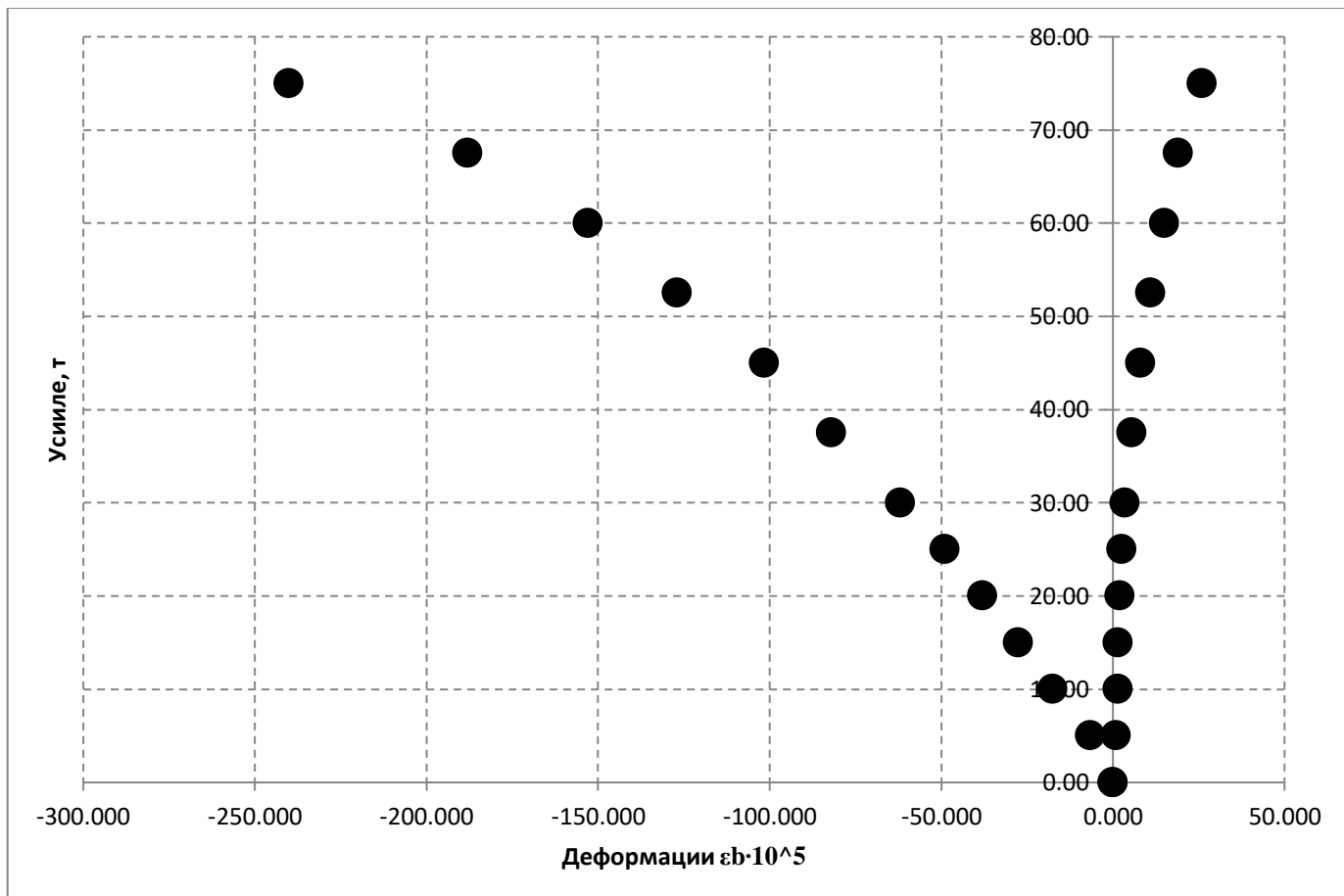


Рисунок 22 – Разрушение четвертой призмы с усилением, при внецентренном нагружении, по бетону

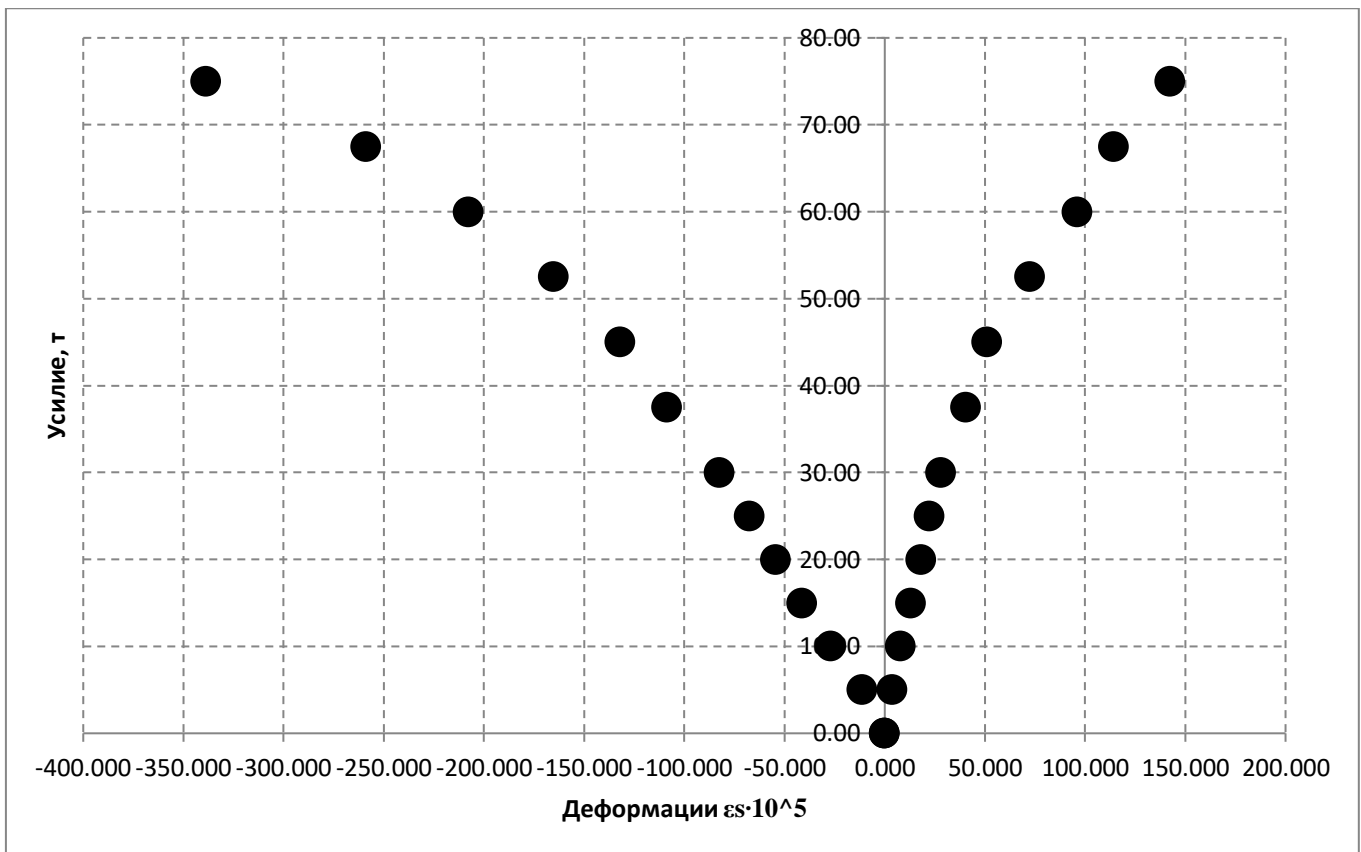


Рисунок 23 – Разрушение четвертой призмы с усилением, при внецентренном нагружении, по уголкам

Полученные экспериментальные данные были использованы при расчете нелинейной деформационной модели, по полученным графикам получилось провести сравнительный анализ и вывести численные значения эффекта обоймы.

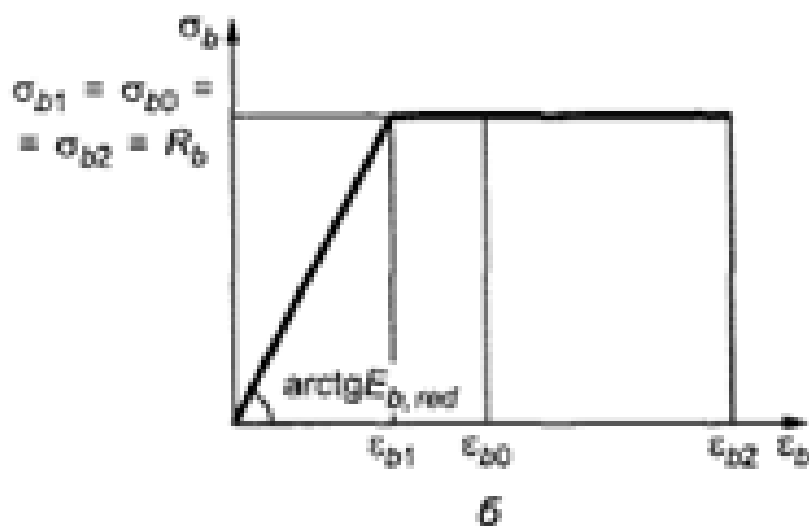
### 3.2 Разработка деформационной модели для получения теоретических значений

Для получения теоретических разрушающих значений был произведен расчет нелинейной деформационной модели. Метод расчета предусматривает в себе применение диаграмм состояния бетона и арматуры. Такие диаграммы деформирования материалов включены в нормативные документы, что позволяет использовать их в расчете. В России этот расчет описан в СП

63.13330.2018 [18]. Подобный расчет позволяет выполнять проектирование с проверкой требований первой и второй групп предельных состояний, оценить необходимость проведения усиления, что позволяет использовать его также и в поверочных расчетах строительных конструкций.

Благодаря использованию диаграмм деформирования материалов в расчетах можно сразу учитывать упругопластические свойства бетона и пластические деформации арматуры.

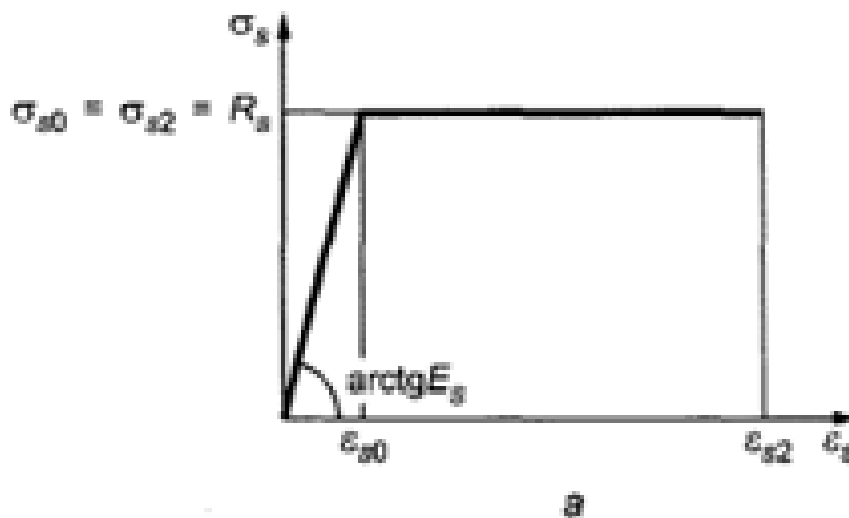
В соответствии с СП 63.13330.2018 на рисунке 24 представлена двухлинейная диаграмма сжатого бетона.



б – двухлинейная диаграмма

Рисунок 24 – Диаграммы состояния сжатого бетона [3]

А также в СП представлена двухлинейная диаграмма растянутой арматуры (см. рис. 25).



а – двухлинейная диаграмма

Рисунок 25 – Диаграммы состояния растянутой арматуры [3]

«При расчете по прочности усилия и деформации в сечении, нормальном к продольной оси элемента, определяют на основе нелинейной деформационной модели, использующей уравнения равновесия внешних сил и внутренних усилий в сечении элемента, а также следующих положений:

- распределение относительных деформаций бетона и арматуры по высоте сечения элемента принимают по линейному закону (гипотеза плоских сечений);
- связь между осевыми напряжениями и относительными деформациями бетона и арматуры принимают в виде диаграмм состояния (деформирования) бетона и арматуры;
- сопротивление бетона растянутой зоны допускается не учитывать, принимая при  $\epsilon_{bi} \geq 0$  напряжения  $\sigma_{bi} = 0$ . В отдельных случаях (например, изгибаемые и внецентренно сжатые бетонные конструкции, в которых не допускают трещины) расчет по прочности производят с учетом работы растянутого бетона» [3].

Для получения теоретических значений разрушающих усилий был реализован расчет по деформационной модели, согласно блок-схеме, представленной на рисунке 26.



Рисунок 26 – Блок-схема по расчету на основе деформационной модели

В данной магистерской диссертации с помощью деформационной модели были получены теоретические значения разрушающего усилия, при центральном и внецентренном нагружении.

Исходные данные:

$R_s=245$  МПа (продольные уголки из стали С245);

$R_b=41,7$  МПа (полученное среднее значение призмической прочности);

$E_b=27\ 800$  МПа;

$E_s=206\ 000$  МПа;

$A_s=1\ 232$  мм<sup>2</sup>

Сечение разбивается на участки  $\frac{150}{10}=15$  мм, площадь каждого участка при этом  $A_{bi}=150 \cdot 15=2\ 250$  мм<sup>2</sup>.

Таблица 7 – Расчет координат и площадей в участках по бетону

| Координата центра тяжести, $z_{bi}$ ,<br>мм |         | Площадь участка, $A_{bi}$ , мм <sup>2</sup> |          |
|---|---------|---|----------|
| $z_{b1}$                                    | -7,50   | $A_{b1}$                                    | 2 250,00 |
| $z_{b2}$                                    | -22,50  | $A_{b2}$                                    | 2 250,00 |
| $z_{b3}$                                    | -37,50  | $A_{b3}$                                    | 2 250,00 |
| $z_{b4}$                                    | -52,50  | $A_{b4}$                                    | 2 250,00 |
| $z_{b5}$                                    | -67,50  | $A_{b5}$                                    | 2 250,00 |
| $z_{b6}$                                    | -82,50  | $A_{b6}$                                    | 2 250,00 |
| $z_{b7}$                                    | -97,50  | $A_{b7}$                                    | 2 250,00 |
| $z_{b8}$                                    | -112,50 | $A_{b8}$                                    | 2 250,00 |
| $z_{b9}$                                    | -127,50 | $A_{b9}$                                    | 2 250,00 |
| $z_{b10}$                                   | -142,50 | $A_{b10}$                                   | 2 250,00 |

Таблица 8 – Расчет координат и площадей в участках по уголкам

| Координата центра тяжести, $z_{sj}$ ,<br>мм |        | Площадь участка, $A_{si}$ , мм <sup>2</sup> |        |
|---|--------|---|--------|
| $z_{s1}$                                    | 2,0    | $A_{s1}$                                    | 308,00 |
| $z_{s2}$                                    | -16,0  | $A_{s2}$                                    | 308,00 |
| $z_{s9}$                                    | -134,0 | $A_{s9}$                                    | 308,00 |
| $z_{s1}$                                    | -152,0 | $A_{s10}$                                   | 308,00 |

Для центрального нагружения определяем основные параметры при усилении в 60 т.

Определение жесткостных характеристик  $D_{11}$ ,  $D_{12}$ ,  $D_{22}$ .

Таблица 9 – Расчет значений  $D_{11}$ ,  $D_{12}$ ,  $D_{22}$  для бетона

| №        | $D_{11}$             | $D_{12}$           | $D_{22}$       |
|----------|----------------------|--------------------|----------------|
| 1        | 3 518 437 500,00     | -469 125 000,00    | 62 550 000,00  |
| 2        | 31 665 937 500,00    | -1 407 375 000,00  | 62 550 000,00  |
| 3        | 87 960 937 500,00    | -2 345 625 000,00  | 62 550 000,00  |
| 4        | 172 403 437 500,00   | -3 283 875 000,00  | 62 550 000,00  |
| 5        | 284 993 437 500,00   | -4 222 125 000,00  | 62 550 000,00  |
| 6        | 425 730 937 500,00   | -5 160 375 000,00  | 62 550 000,00  |
| 7        | 594 615 937 500,00   | -6 098 625 000,00  | 62 550 000,00  |
| 8        | 791 648 437 500,00   | -7 036 875 000,00  | 62 550 000,00  |
| 9        | 1 016 828 437 500,00 | -7 975 125 000,00  | 62 550 000,00  |
| 10       | 1 270 155 937 500,00 | -8 913 375 000,00  | 62 550 000,00  |
| $\Sigma$ | 4 679 521 875 000,00 | -46 912 500 000,00 | 625 500 000,00 |



Таблица 10 – Расчет значений  $D_{11}$ ,  $D_{12}$ ,  $D_{22}$  для арматуры

| №        | $D_{11}$             | $D_{12}$           | $D_{22}$       |
|----------|----------------------|--------------------|----------------|
| 1        | 253 792 000,00       | 126 896 000,00     | 63 448 000,00  |
| 2        | 16 242 688 000,00    | -1 015 168 000,00  | 63 448 000,00  |
| 3        | 1 139 272 288 000,00 | -8 502 032 000,00  | 63 448 000,00  |
| 4        | 1 465 902 592 000,00 | -9 644 096 000,00  | 63 448 000,00  |
| $\Sigma$ | 2 621 671 360 000,00 | -19 034 400 000,00 | 253 792 000,00 |

$$D_{11} = 4\,679\,521\,875\,000,00 + 2\,621\,671\,360\,000,00 = \\ = 7\,301\,193\,235\,000,00 \text{ мм}^4 \cdot \text{МПа};$$

$$D_{12} = -46\,912\,500\,000,00 + (-19\,034\,400\,000,00) = -65\,946\,900\,000,00 \text{ мм}^3 \cdot \text{МПа};$$

$$D_{22} = 625\,500\,000,00 + 253\,792\,000,00 = 879\,292\,000,00 \text{ мм}^2 \cdot \text{МПа}.$$

Определение кривизны и относительной деформации.

Определяем кривизну  $1/r$  и относительную деформацию  $\varepsilon_0$  решением системы уравнений, по формуле 15:

$$\begin{cases} M_x = D_{11} \frac{1}{r} + D_{12} \varepsilon_0; \\ N = D_{12} \frac{1}{r} + D_{22} \varepsilon_0 \end{cases}; \quad (15)$$

$$\begin{cases} \frac{1}{r} = \left( \frac{-D_{22} \varepsilon_0 + N}{D_{12}} \right); \\ M_x = \frac{D_{11}}{D_{12}} N - \varepsilon_0 \left( \frac{D_{11} D_{22}}{D_{12}} - D_{12} \right); \end{cases} \quad (16)$$

$$\varepsilon_0 = \frac{D_{11}}{D_{12}} N-M / \left( \frac{D_{11}D_{22}}{D_{12}} - D_{12} \right); \quad (17)$$

$$\varepsilon_0 = -0,0006823672;$$

$$\frac{1}{r_1} = 0,0000000000$$

Расчет для каждой  $i$ -ой бетонной полоски и  $j$ -ого арматурного стержня деформаций в первой итерации. По формулам 18 и 19 определяем распределения деформаций по сечению элемента в бетоне и арматуре соответственно (см. табл. 11):

$$\varepsilon_{bi} = \varepsilon_0 + \frac{1}{r} z_{bi}; \quad (18)$$

$$\varepsilon_{sj} = \varepsilon_0 + \frac{1}{r} z_{sj} \quad (19)$$

Таблица 11 – Распределение деформаций в бетоне и уголках

| №    | $\varepsilon_{b1-10}$ | $\varepsilon_{s1-10}$ |
|------|-----------------------|-----------------------|
| 1-10 | -0,000682367177229    | -0,0006823672         |

Определение напряжений  $\sigma_{bi}$  и  $\sigma_{sj}$  в первой итерации (см. табл. 3.10):

Таблица 12 – Распределение напряжений в бетоне и уголках

| №    | $\sigma_{b1-10}$ | $\sigma_{s1-10}$ |
|------|------------------|------------------|
| 1-10 | -18,97           | -140,57          |

Определяем коэффициенты упругопластических деформаций  $i$ -го участка бетона ( $v_{bi}$ ) и  $j$ -го участка арматуры ( $v_{sj}$ ), выражая их из зависимостей (формулы 20 и 21):

$$v_{bi} = \frac{\sigma_{bi}}{E_{b,red} \varepsilon_{bi}}; \quad (20)$$

$$v_{sj} = \frac{\sigma_{sj}}{E_s \varepsilon_{sj}} \quad (21)$$

$$v_{b1-10} = 1; v_{s1-10} = 1,0$$

Для центрально сжатого элемента значение разрушающего усилия по расчету с помощью деформационной модели принимается  $N_{ult} = 1\,245\,000$  Н (124,5 т).

Для внецентренного нагружения определяем основные параметры при усилии в 60 т, с величиной эксцентриситета 30 мм от грани призмы, 45 мм от центра прикладываемой нагрузки.

Определение жесткостных характеристик  $D_{11}$ ,  $D_{12}$ ,  $D_{22}$ .

Таблица 13 – Расчет значений  $D_{11}$ ,  $D_{12}$ ,  $D_{22}$  для бетона

| № | $D_{11}$           | $D_{12}$          | $D_{22}$      |
|---|--------------------|-------------------|---------------|
| 1 | 2                  | 3                 | 4             |
| 1 | 2 864 891 416,31   | -381 985 522,18   | 50 931 402,96 |
| 2 | 29 475 954 191,46  | -1 310 042 408,51 | 58 224 107,04 |
| 3 | 87 960 937 500,00  | -2 345 625 000,00 | 62 550 000,00 |
| 4 | 172 403 437 500,00 | -3 283 875 000,00 | 62 550 000,00 |
| 5 | 284 993 437 500,00 | -4 222 125 000,00 | 62 550 000,00 |
| 6 | 425 730 937 500,00 | -5 160 375 000,00 | 62 550 000,00 |

Продолжение таблицы 13

| 1        | 2                    | 3                  | 4              |
|----------|----------------------|--------------------|----------------|
| 7        | 594 615 937 500,00   | -6 098 625 000,00  | 62 550 000,00  |
| 8        | 791 648 437 500,00   | -7 036 875 000,00  | 62 550 000,00  |
| 9        | 0,00                 | 0,00               | 0,00           |
| 10       | 0,00                 | 0,00               | 0,00           |
| $\Sigma$ | 2 389 693 970 607,77 | -29 839 527 930,68 | 484 455 510,00 |

Таблица 14 – Расчет значений  $D_{11}$ ,  $D_{12}$ ,  $D_{22}$  для арматуры

| №        | $D_{11}$             | $D_{12}$           | $D_{22}$       |
|----------|----------------------|--------------------|----------------|
| 1        | 151 806 732,46       | 75 903 366,23      | 37 951 683,12  |
| 2        | 9 715 630 877,62     | -607 226 929,85    | 37 951 683,12  |
| 3        | 1 139 272 288 000,00 | -8 502 032 000,00  | 63 448 000,00  |
| 4        | 1 465 902 592 000,00 | -9 644 096 000,00  | 63 448 000,00  |
| $\Sigma$ | 2 615 042 317 610,08 | -18 677 451 563,62 | 202 799 366,23 |

$$D_{11} = 2\,389\,693\,970\,607,77 + 2\,615\,042\,317\,610,08 = \\ = 5\,004\,736\,288\,217,85 \text{ мм}^4 \cdot \text{МПа};$$

$$D_{12} = -29\,839\,527\,930,68 + (-18\,677\,451\,563,62) = -48\,516\,979\,494,30 \text{ мм}^3 \cdot \text{МПа};$$

$$D_{22} = 484\,455\,510,00 + 202\,799\,366,23 = 687\,254\,876,23 \text{ мм}^2 \cdot \text{МПа}.$$

Определение кривизны и относительной деформации.

Определяем кривизну  $1/r$  и относительную деформацию  $\varepsilon_0$  решением системы уравнений по формуле 15:

$$\varepsilon_0 = -0,0019615633;$$

$$\frac{1}{r_1} = -0,0000154192$$

Расчет для каждой  $i$ -ой бетонной полоски и  $j$ -ого арматурного стержня деформаций в первой итерации. По формулам 18 и 19 определяем распределения деформаций по сечению элемента в бетоне и арматуре соответственно (см. табл. 15).

Для подсчета деформаций по уголкам были использованы фактические координаты установки мессур, с учетом выноса датчиков от конструкции на 40 мм (см. рис. 27)

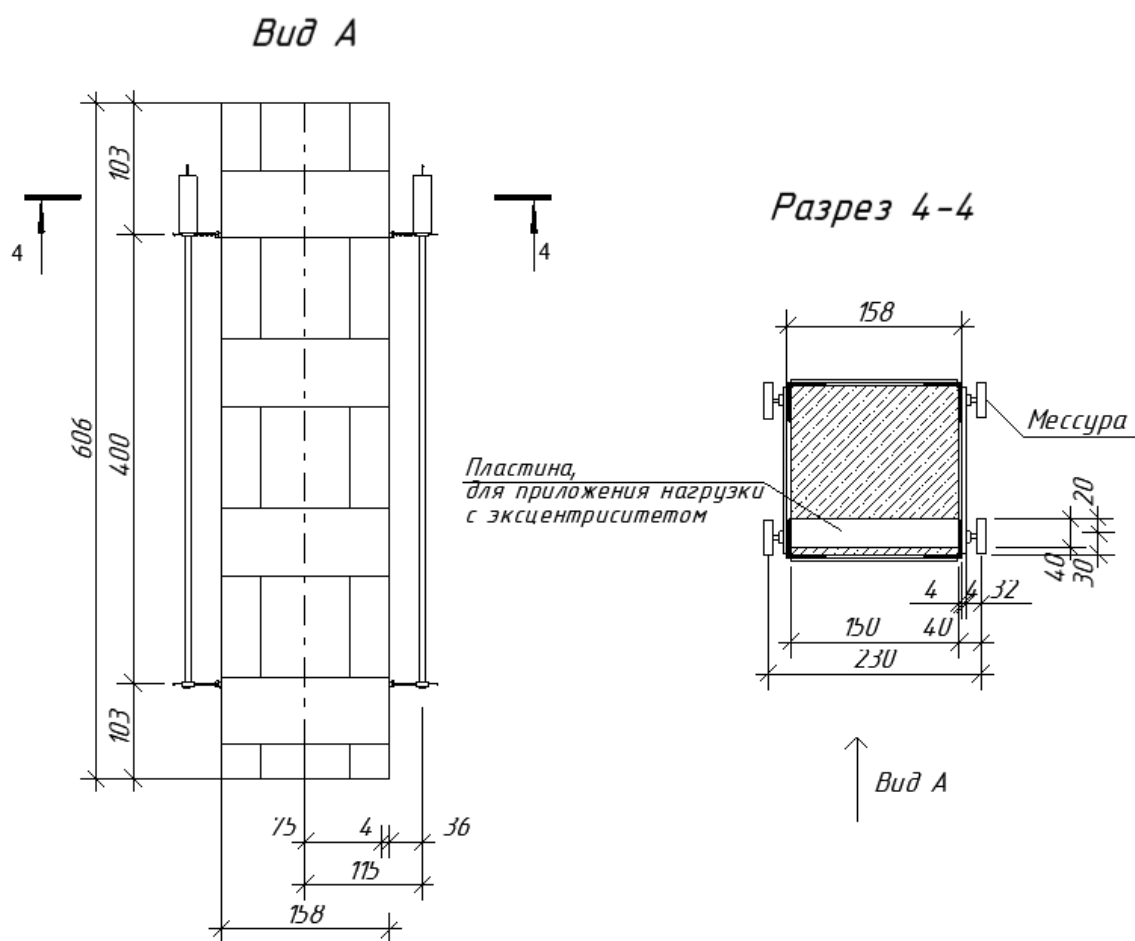


Рисунок 27 – Вынос датчиков

Таблица 15 – Распределение деформаций в бетоне и уголках

| №  | $\varepsilon_{b1-10}$ | $\varepsilon_{s1-10}$ |
|----|-----------------------|-----------------------|
| 1  | -0,001961563          | -0,002578332          |
| 2  | -0,001614630879942    | -0,002578332          |
| 3  | -0,001383342587664    |                       |
| 4  | -0,001152054295386    |                       |
| 5  | -0,000920766003108    |                       |
| 6  | -0,000689477710830    |                       |
| 7  | -0,000458189418551    |                       |
| 8  | -0,000226901126273    |                       |
| 9  | 0,000004387166005     | 0,0009680884          |
| 10 | 0,0003513196          | 0,0009680884          |

Определение напряжений  $\sigma_{bi}$  и  $\sigma_{sj}$  в первой итерации (см. табл. 16):

Таблица 16 – Распределение напряжений в бетоне и уголках

| №  | $\sigma_{b1-10}$ | $\sigma_{s1-10}$ |
|----|------------------|------------------|
| 1  | -41,70           | -245,00          |
| 2  | -41,70           | -245,00          |
| 3  | -38,46           |                  |
| 4  | -32,03           |                  |
| 5  | -25,60           |                  |
| 6  | -19,17           |                  |
| 7  | -12,74           |                  |
| 8  | -6,31            |                  |
| 9  | 0,00             | 21,55            |
| 10 | 0,00             | 21,55            |

Определяем коэффициенты упругопластических деформаций  $i$ -го участка бетона ( $\nu_{bi}$ ) и  $j$ -го участка арматуры ( $\nu_{sj}$ ), выражая их из зависимостей (формулы 20 и 21):

$$\nu_{b1}=0,81; \nu_{b2}=0,93; \nu_{b1}=1,0;$$

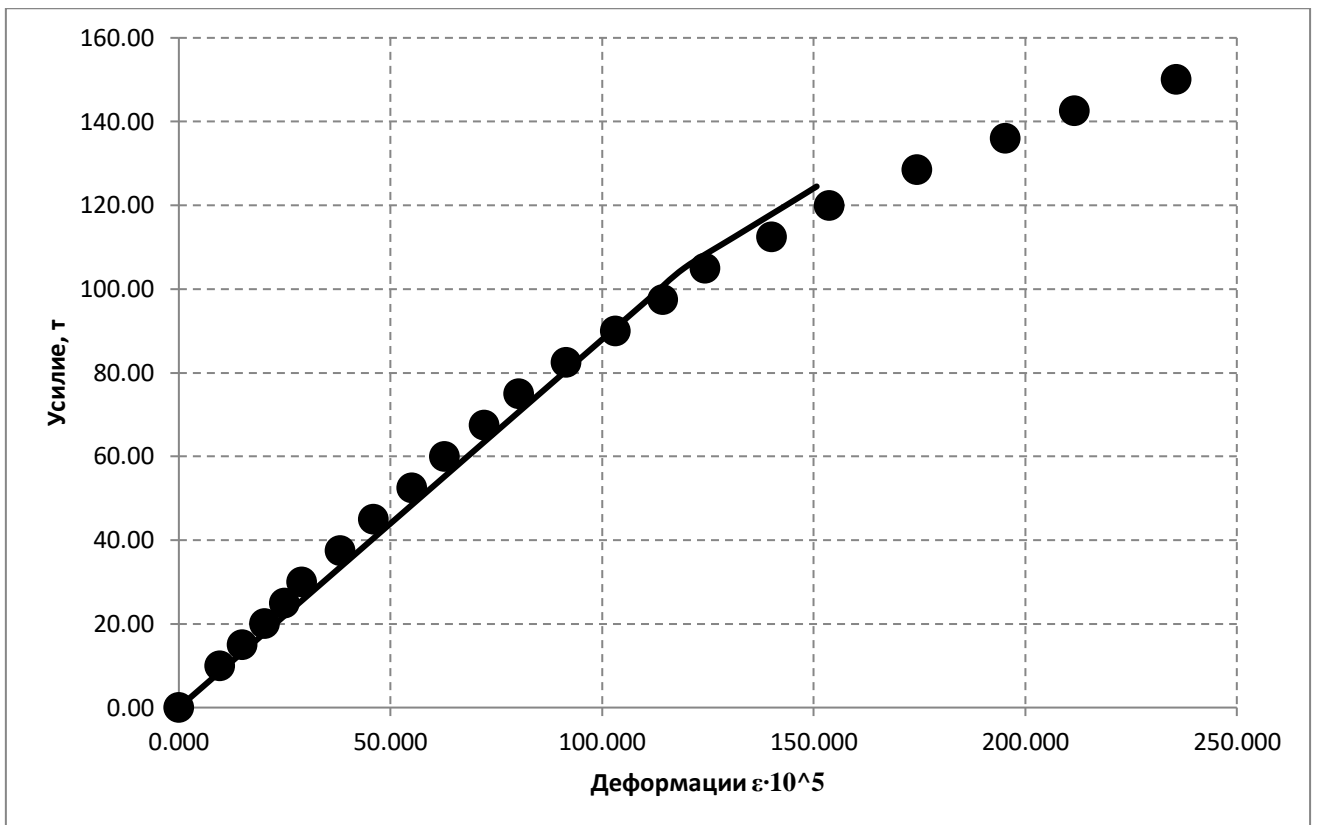
$$\nu_{s1-2}=0,60; \nu_{b9-10}=1,0$$

Для внецентренно сжатого элемента значение разрушающего усилия принимается  $N_{ult}=680\ 000\ \text{Н}$  (68 т).

### **3.3 Сравнительный анализ теоретических и экспериментальных значений**

Для сравнения теоретических и экспериментальных значений призм с центральным и внецентренным приложением нагрузки, в деформационную модель были подставлены все шаги нагружения, как при эксперименте.

Получив теоретические (124,5 т) и экспериментальные (155 т) значения разрушающих усилий для призмы с центральным приложением нагрузки можно сделать вывод, что наблюдается сильное расхождение, представлено на рис. 28.



● – значения третьей испытанной призмы с усилением; — – значения с деформационной модели при модуле 27 800

Рисунок 28 – Сравнение экспериментальных значений и значений, полученных с помощью расчета по деформационной модели на усиленной призме, при центральном приложении нагрузки

Как известно, эффект обоймы влияет на повышение прочности усиленного элемента. В расчете деформационной модели был принят приведенный начальный модуль упругости бетона, как предписывает СП 63.13330.2018, но тогда получается, что расчетом не учитывается эффект обоймы.

Автором выдвинута гипотеза, что при повышении прочностных характеристик необходимо увеличивать величину начального модуля упругости бетона. Для наглядности представлена таблица 17, где показана зависимость величины разрушающего усилия от изменения прочности и начального модуля упругости бетона.



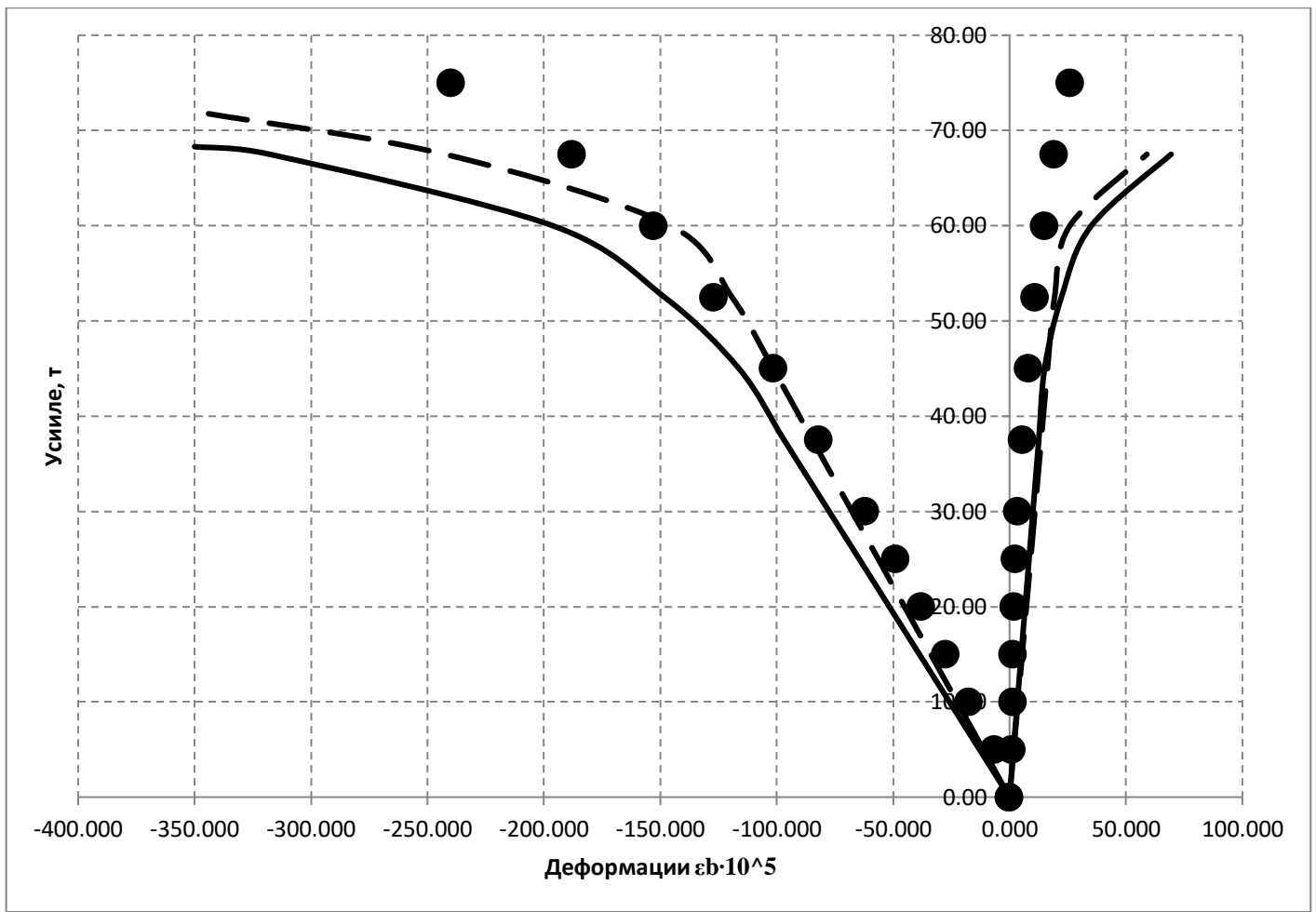
Таблица 17 – Сравнение полученных разрушающих усилий

| При $\varepsilon_{cp}=0,0015$ | $1 \cdot R_b$ | $1,05 \cdot R_b$ | $1,1 \cdot R_b$ | $1,15 \cdot R_b$ | $1,2 \cdot R_b$ | $1,25 \cdot R_b$ | $1,3 \cdot R_b$ |
|-------------------------------|---------------|------------------|-----------------|------------------|-----------------|------------------|-----------------|
| $R_b$ , МПа                   | 41,7          | 43,8             | 45,9            | 47,9             | 50,0            | 52,1             | 54,2            |
| $E_{b,red}$ , МПа             | 27 800        | 29 190           | 30 580          | 31 970           | 33 360          | 34 800           | 36 140          |
| $N_{разр}$ , Т                | 124,5         | 128,5            | 133,5           | 138              | 142,5           | 148              | 152             |

Как видно из сравнения, начиная с модуля 34 800 значения разрушающего усилия близки к экспериментальным значениям. Для того, чтобы обеспечивать необходимый запас при расчете, предлагается использовать в расчетах начальный модуль упругости, который соответствует  $E_b=34\ 800$ . Данный модуль был также получен, как среднее значение с испытаний двух неусиленных призм.

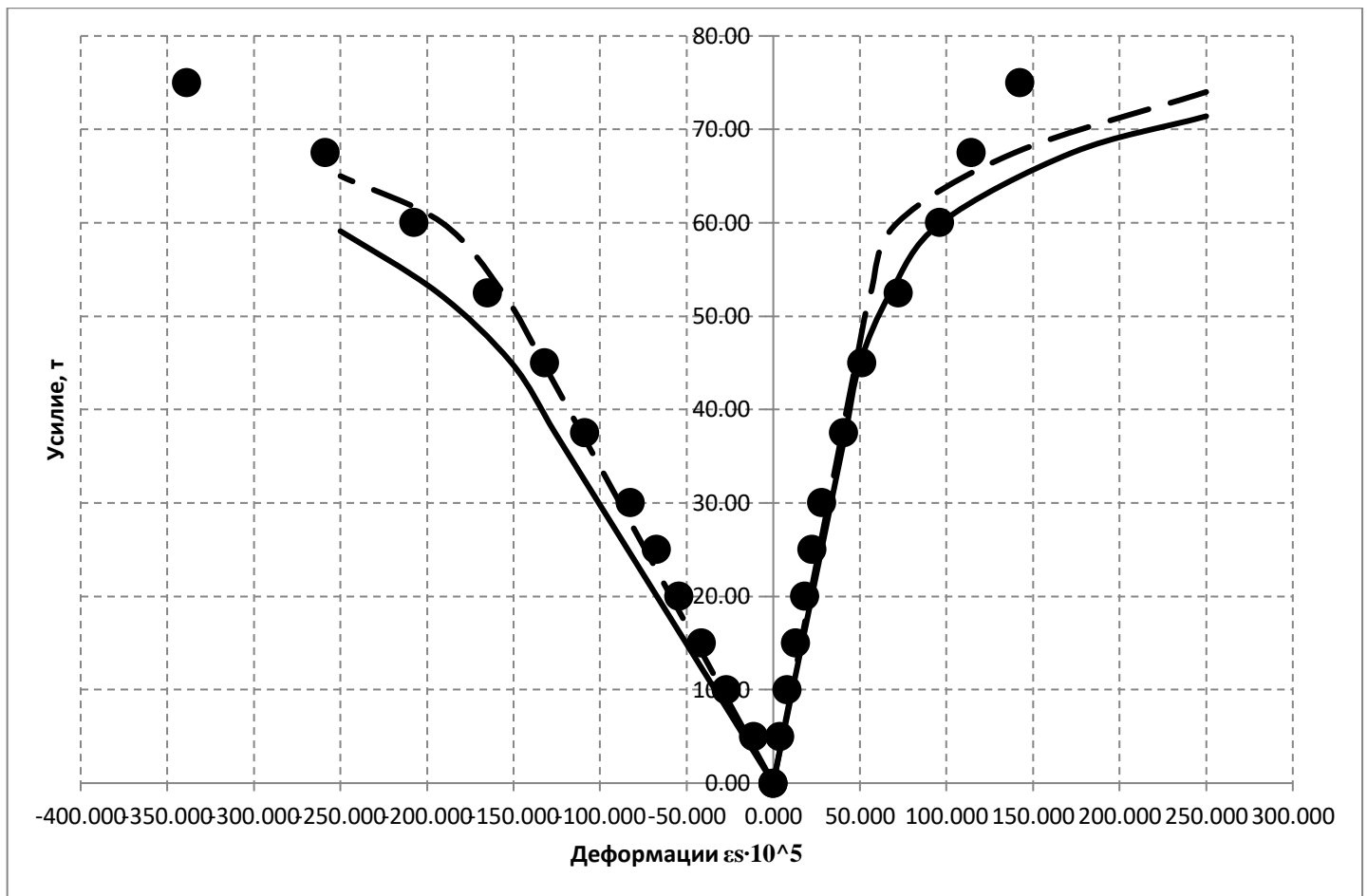
На усиленную призму с внецентренным приложением нагрузки помимо мессур, для измерения относительных деформаций по уголкам, были также установлены тензометры Гугенбергера, для измерений деформаций по бетону. Полученные данные позволяют построить два отдельных графика для работы металла и бетона (см. рис. 29 и 30).

Также на графики нанесены данные с учетом выдвинутого мнения по поводу влияния начального модуля упругости бетона на значения разрушающего усилия.



● – значения четвертой испытанной призмы с усилением; — — значения с деформационной модели при модуле 27 800, - - - значения с деформационной модели при модуле 34 800

Рисунок 29 – Сравнение деформаций по бетону, полученных при проведении эксперимента и расчете деформационной модели



- – значения четвертой испытанной призмы с усилением; — — значения с деформационной модели при модуле 27 800, - - - значения с деформационной модели при модуле 34 800

Рисунок 30 – Сравнение деформаций по уголкам, полученных при проведении эксперимента и расчете деформационной модели

На графиках видно, что теоретические значения деформаций при одинаковых шагах нагружения более близки к экспериментальным, при использовании начального модуля в расчете  $E_b=34\ 800$ , что подтверждает выдвинутую гипотезу.

Можно сделать вывод, что эффект обоймы обуславливается увеличением прочности и повышением начального модуля упругости бетона. Данный вывод позволит использовать расчет по нелинейной деформационной модели, применительно к усиленным конструкциям стальными элементами.

### **Выводы по третьей главе**

В 3 главе была рассчитана деформационная модель на основе двухлинейных диаграмм сжатого состояния бетона и растянутой арматуры, получены теоретические значения разрушающих усилий.

В результате разработанной программы экспериментального исследования и за счет проведения испытаний контрольных образцов получилось определить основные прочностные и деформативные свойства усиленного элемента.

Был проведен сравнительный анализ полученных значений. Была научно подтверждена выдвинутая гипотеза по учету эффекта обоймы в расчетах, с помощью применения начального модуля упругости, вместо приведенного.

## Заключение

По ходу выполнения магистерской работы были выполнены задачи:

- подтверждена недостаточность разработанной нормативной базы по усилению железобетонных конструкций стальными элементами с помощью проведенного литературного обзора;
- разработана программа экспериментального исследования, запроектированы и изготовлены исследуемые образцы, проведены испытания образцов при центральном и внецентренном сжатии;
- получены экспериментальные значения прочностных и деформативных параметров бетонного элемента, усиленного стальной обоймой;
- установкой двух независимых систем измерения деформаций, закрепленных на бетоне и стальных уголках, подтверждена совместность работы двух материалов от начала нагружения до разрушения образцов;
- экспериментально подтверждено влияние эффекта обоймы на несущую способность центрально и внецентренно сжатых бетонных элементов, усиленных стальной обоймой;
- предложено при реализации нелинейной деформационной модели учесть эффект обоймы осуществлять посредством корректировки начального модуля бетона, замкнутого в стальной обойме;
- сравнением теоретических и экспериментальных данных доказана возможность применения нелинейной деформационной модели при расчете конструкции, усиленной стальной обоймой;
- применение двухлинейной диаграммы деформирования бетона не позволяет полноценно оценить напряженно-деформированное состояние усиленных центрально сжатых элементов, при этом является достаточной для численной оценки прочности и деформативности внецентренно сжатых элементов.

## Список используемой литературы и используемых источников

1. Бетоны. Методы определения призмочной прочности, модуля упругости и коэффициента Пуассона [Электронный ресурс] : ГОСТ 24452-80. URL: <https://docs.cntd.ru/document/9056198> (дата обращения: 17.01.2023).
2. Бетоны. Методы определения прочности по контрольным образцам [Электронный ресурс] : ГОСТ 10180-2012. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200100908> (дата обращения: 17.01.2023).
3. Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения [Электронный ресурс] : СП 63.13330.2018 от 20-06-2019. URL: <https://docs.cntd.ru/document/554403082> (дата обращения: 05.04.2023).
4. Гроздов В.Т., Теряник В.В. О прочности и деформативности колонн, усиленных обоймами: Изв. вузов. // Строительство и архитектура. Москва; 1989. № 3. – С.8 – 10.
5. Деменев А.В., Артамонов А.С. Информационное моделирование при эксплуатации зданий и сооружений // Интернет-журнал «НАУКОВЕДЕНИЕ». 2015 г. № 7(3). С. 1-9.
6. Ерышев В.А. К расчетам прочности изгибаемых железобетонных элементов с использованием диаграмм деформирования материалов // Строительная механика и расчет сооружений. 2019 г. № 1(282). С. 28-33.
7. Здания и сооружения. Правила обследования и мониторинга технического состояния [Электронный ресурс] : ГОСТ 31397-2011 от 01-01-2014. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200100941> (дата обращения: 05.04.2023).
8. Игнатенко А.В. Расчет бетонной колонны сплошного сечения со стальной обоймой // Вестник ХНАДУ. 2011 г. № 52. С. 60-63.
9. Калинин А.А. Обследование, расчет и усиление зданий и сооружений: Учебное пособие / Издательство Ассоциации строительных вузов. Москва; 2004, 160 с.

10. Конструкции бетонные и железобетонные. Правила ремонта и усиления [Электронный ресурс] : СП 349.1325800.2017 от 13-06-2018. URL: <https://docs.cntd.ru/document/550507449> (дата обращения: 05.05.2023).

11. Мансур Хасан. Использование стекловолокна в качестве современного метода укрепления железобетонных колонн // Технические науки «Молодой ученый». 2019 г. № 10 (248). С. 12-18.

12. Маяцкая И.А., Федченко А.Е., Дохойн Е.В., Ваганова С.Е. Технология усиления строительных конструкций при возведении и ремонте сооружений // Молодой исследователь Дона. 2019 г. № 1 (16). С. 60-63.

13. Методическое пособие. Ремонт и усиление железобетонных конструкций / Министерство строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации. М., 2016.

14. Мосин М.В. Оценка эффекта и эффективности усиления металлическими уголковыми обоями усиления железобетонных колонн с возможностью обжатия // Вестник СибАДИ. 2017 г. № 54. С. 112-119.

15. Муленкова В.И., Артюшин Д.В. Расчет и конструирование усиления железобетонных и каменных конструкций : учеб. пособие. Пенза : ПГУАС, 2014. 118 с.

16. Мясников Н.Н. Актуальность проблемы реконструкции и восстановления зданий // Технические науки «Молодой ученый». 2018 г. № 48 (234). С. 34-36.

17. Рекомендации по проектированию усиления железобетонных конструкций зданий и сооружений реконструируемых предприятий. Надземные конструкции и сооружения / Харьк. ПромстройНИИ-проект, НИИЖБ. М., 1992.

18. Семенюк С.Д., Мельянцова И.И., Башкиров В.В. Методика экспериментальных исследований сжатых железобетонных элементов, усиленных стальной обоймой // Вестник Белорусско-Российского университета. 2013 г. № 2 (39). С. 171-177.

19. Старишко И.Н.. Расчет несущей способности внецентренно сжатых железобетонных элементов при различных значениях эксцентриситетов приложения продольных сил // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2015 г. № 5. С. 21-33.

20. Теряник В.В. Усиление сжатых железобетонных колонн обоймами // Научно-технический и производственный журнал «Жилищное строительство». 2010 г. № 2. С. 24-25.

21. Теряник В.В. Прочность, устойчивость и деформативность железобетонных колонн, усиленных обоймами: Монография / Федеральное агентство по образованию. Челябинск; 2004, 187 с.

22. Теряник В.В., Борисов А.О. Испытания внецентренно сжатых железобетонных элементов, усиленных с использованием полимерного клея // Строительство. 2010 г. № 8. С. 43-45.

23. Теряник В.В., Бирюков А.Ю. Результаты экспериментальных исследований прочности и деформативности сжатых усиленных элементов реконструируемых зданий // Вестник ЮУрГУ. 2009 г. № 35. С. 21-23.

24. Тошин Д.С. Работа бетона при усилении конструкции под нагрузкой // Академический вестник УРАЛНИИПРОЕКТ РААСН. 2015 г. № 3. С. 66-68.

25. Усиление железобетонных конструкций композитными материалами [Электронный ресурс] : СП 164.1325800.2014 от 01-09-2014. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200113273> (дата обращения 05.05.2023).

26. Хайруллин В.А., Терехов И.Г., Ильясова К.Р. Факторы морального износа второго рода при оценке социального эффекта при проведении капитального ремонта жилого здания // Интернет-журнал «НАУКОВЕДЕНИЕ». 2015 г. № 5. С. 1-15.

27. Alaa Hussein Al-Zuhairi, Ali Hussein Ali Al-Ahmed, Ammar N. Hanoon, Ali A. Abdulhameed. Structural Behavior of Reinforced Hybrid Concrete Columns under Biaxial Loading // Latin American Journal of Solids and Structures. 2021. № 18(6). С. 1-18.



28. Alessia Mangialardo\* and Ezio Micelli. Reconstruction or Reuse? How Real Estate Values and Planning Choices Impact Urban Redevelopment // Sustainability. 2020. № 12, 4060. C. 1-15.

29. Lee C., Bonacci J.F., Thomas M.D.A., Maalej M., Khajehpour S., Hearn N., Pantazopoulou S., and Sheikh S.. Accelerated corrosion and repair of reinforced concrete columns using carbon fibre reinforced polymer sheets // Can. J. Civ. Eng. 2000. № 27. C. 941-948.

30. Xiantao Zeng, Zhenhua Ren. A New Method for Reinforcing Concrete Rectangular Section Columns // Current Trends in Civil & Structural Engineering. 2019. № 3(1). C. 1-3.

31. Zhexiong SHANG and Zhigang SHEN. Real-time 3D Reconstruction on Construction Site using Visual SLAM and UAV, 2021.