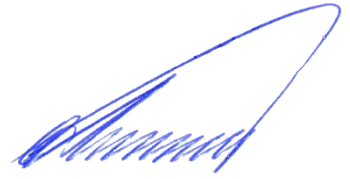


На правах рукописи

Лапшинов Андрей Евгеньевич



**ПРОЧНОСТЬ И ДЕФОРМАТИВНОСТЬ БЕТОННЫХ КОЛОНН, АРМИРОВАННЫХ НЕМЕТАЛЛИЧЕСКОЙ КОМПОЗИТНОЙ АРМАТУРОЙ**

2.1.1 – Строительные конструкции, здания и сооружения

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание учёной степени  
кандидата технических наук

Москва – 2023

Работа выполнена в ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет» (НИУ МГСУ).

**Научный руководитель:** Доктор технических наук, профессор  
**Тамразян Ашот Георгиевич**

**Официальные оппоненты:** **Кришан Анатолий Леонидович**  
доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», кафедра «Проектирование и строительство зданий», профессор

**Орлова Марина Анатольевна**  
кандидат технических наук, доцент, ФГБОУ ВО «Ивановский государственный политехнический университет», кафедра Строительства и инженерных систем, доцент

**Ведущая организация:** АО «Центральный научно-исследовательский и проектно-экспериментальный институт промышленных зданий и сооружений - ЦНИИПромзданий», г. Москва

Защита диссертации состоится «27» сентября 2023 г. в 13:00 на заседании диссертационного совета 24.2.339.09, созданного на базе ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет» по адресу: 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д.26, (9 студия «Открытая сеть»).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет» и на сайте [www.mgsu.ru](http://www.mgsu.ru).

Автореферат разослан «\_\_» \_\_\_\_\_ 2023 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета

Сафина Галина Леонидовна

## 1. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы исследования.** Наиболее массовыми среди применяемых в современном строительстве в нашей стране конструктивных элементов являются железобетонные конструкции, проблема снижения материалоемкости и энергоёмкости производства которых, а также оптимизация параметров идёт по разным направлениям. При этом одной из общемировых тенденций совершенствования арматуры в железобетоне является всё большее использование композитной полимерной арматуры вместо традиционной стальной, и особенно в тех областях, где проблема коррозии стоит наиболее остро. Для этого достаточно часто применяется композитная арматура, которая, благодаря высокой коррозионной стойкости и диэлектрическим свойствам, находит применение в конструкциях, эксплуатируемых в условиях химических и агрессивных воздействий. Одними из перспективных областей применения композитной арматуры, где могут быть реализованы её антикоррозийные свойства, являются колонны причалов, силосов, бункеров, очистных и других сооружений, находящихся в условиях агрессивных сред. Предлагаемые мероприятия обеспечат экономический эффект за счёт снижения эксплуатационных расходов, связанных с отсутствием необходимости в частом ремонте, усилении или замене конструкций из-за коррозии стальной арматуры. В этой связи представляет большой практический интерес поиск путей расширения области применения композитной арматуры в различных отраслях промышленности для защиты возводимых объектов от неблагоприятного воздействия внешней среды.

Вопросы использования в строительных конструкциях неметаллической, и в основном стеклокомпозитной арматуры, ранее исследовались недостаточно ввиду её относительно высокой стоимости. В связи с бурным развитием химической промышленности объём выпуска АСК в последнее время был существенно увеличен, а её стоимость понижена. Стеклокомпозитная арматура по стоимости сопоставима со стальной арматурой и вполне может быть использована в качестве замены стальной арматуры в железобетонных конструкциях, эксплуатируемых в агрессивных средах. Это позволяет более широко применять композитную арматуру вместо традиционной стальной при возведении различных строительных объектов. К ним можно отнести отдельные предприятия химической промышленности, например, калийные комбинаты и склады калийных солей; предприятия, вырабатывающие синтетические волокна, строительные конструкции с электрохимической агрессией, а также специальные сооружения с антимагнитными и диэлектрическими свойствами; конструкции из кислотоупорного бетона на жидком стекле с кремнефтористым натрием (для кислых сред), а также из бетона на цементе Сореля и полимербетона.

Перспективы развития железобетона неразрывно связаны с применением как новых материалов, так и их комбинации с уже зарекомендовавшими себя традиционными материалами. Переход строительства на неметаллическую композитную арматуру поможет сократить эксплуатационные затраты на конструкции, находящиеся в условиях агрессивных сред и снизить стоимость жизненного цикла конструкции за

счет увеличенных межремонтных интервалов. Так, по данным исследований снижение стоимости жизненного цикла конструкции с композитной неметаллической арматурой может достигать 53–205% на протяжении 100 лет по сравнению с аналогичной конструкцией с традиционной стальной арматурой.

На момент настоящего исследования не существовало методики расчета центрально-сжатых бетонных элементов, армированных стеклокомпозитной арматурой. Разработка такой методики позволит правильно оценивать несущую способность сжатых элементов с композитной арматурой.

**Степень разработанности темы исследования.** В настоящее время в нашей стране можно отметить недостаток количества исследований сжатых конструкций со композитной арматурой. Необходимость изучения особенностей работы таких конструкций, а также недостаточная изученность влияния стеклокомпозитной арматуры на прочность и деформативность сжатых стеклокомпозитбетонных элементов обусловило актуальность настоящего исследования. Эффективность использования высокопрочной стальной арматуры в сжатых элементах подтверждена исследованиями, проведенными в 70-80-е гг. XX века в СССР и позже в РФ. Экспериментально-теоретические исследования сжатых элементов, армированных высокопрочной стальной и композитной арматурой, а также работами в области эффективно ограниченного бетона и бетона с косвенным армированием проводили А.А. Гвоздев, О.Я. Берг, И.В. Подмостко, Н.М. Мулин, Е.А. Чистяков, Д.С. Ванус, А.Л. Кришан, А.Г. Тамразян, Д.В. Кузеванов, И.К. Манаенков и др. Исследованиями сжатых элементов, армированных стеклокомпозитной арматурой, осуществляли А.В. Бучкин, К.Л. Кудяков, Т.А. Мухамедиев, А.В. Невский, И.В. Подмостко, В.Ф. Савин, В.Ф. Степанова, Н.П. Фролов, Affifi M., Bank L.C., Venmokrane B., A. De Luca, A. Nanni, S. H. Alsayed, Paramanathan и др.

Несмотря на проведенные исследования, вопрос увеличения несущей способности сжатых железобетонных элементов на основе уменьшения шага поперечной арматуры не нашел должного отражения ни в российских, ни в зарубежных нормах, поскольку в обеспечении несущей способности центрально-сжатых элементов большую роль играет бетон, а не арматура, и для большинства расчётных случаев вполне достаточно арматуры классов А400, А500.

Таким образом, ввиду отсутствия рекомендаций по расчету сжатых элементов, армированных композитной арматурой, задача разработки методики с использованием стеклокомпозитной арматуры в качестве рабочей продольной в сжатых элементах является актуальной.

**Объект исследования:** центрально-сжатые бетонные элементы, армированные стержневой стеклокомпозитной арматурой.

**Предмет исследования:** прочность и деформативность центрально-сжатых бетонных элементов, армированных стеклокомпозитной продольной и поперечной арматурой с переменным шагом.

**Научно-техническая гипотеза диссертации.** Несущая способность сжатых бетонных элементов, армированных стеклокомпозитной арматурой зависит от шага размещения поперечной арматуры, при маленьком шаге которой появляется эффект обоймы у бетона внутри арматурного каркаса.

**Цель работы:** разработка методики расчета и конструирования сжатых бетонных элементов, армированных стержневой стеклокомпозитной арматурой.

**Задачи исследования:**

1. Разработать методику расчёта сжатых бетонных элементов, армированных стеклокомпозитной продольной и поперечной арматурой с переменным шагом.
2. Исследовать свойства стеклокомпозитной арматуры на растяжение, сжатие, поперечный срез, сцепление с бетоном.
3. Провести экспериментальные исследования напряженно-деформированного состояния сжатых бетонных элементов, армированных стеклокомпозитной и стальной арматурой.
4. Изучить влияние шага поперечной арматуры на прочностные и деформативные свойства сжатых элементов, армированных стеклокомпозитной арматурой.
5. Исследовать влияние материала продольного и поперечного армирования (сталь, стеклокомпозит) на прочность и деформативность образцов.
6. Изучить влияние физико-механических характеристик стеклокомпозитных хомутов на прочность центрально-сжатых образцов.

**Научная новизна исследования:**

1. Выявленные в результате экспериментальных исследований коротких бетонных колонн закономерности изменения напряженно-деформированного состояния, характера трещинообразования и разрушения.
2. Аналитические зависимости влияния параметров продольного и поперечного армирования (шага) на площадь эффективно-обжатого бетонного ядра и предельную продольную силу, воспринимаемую сжатым бетонным элементом, армированным стеклокомпозитной арматурой.
3. Влияние конфигурации расположения продольной арматуры в сечении на прочность и деформативность сжатых элементов со стеклокомпозитным армированием.
4. Результаты экспериментального определения влияния параметров продольного и поперечного армирования на изменение модуля упругости, коэффициента Пуассона и коэффициента объемной деформации бетонных образцов, армированных стеклокомпозитной арматурой.
5. Влияние материала поперечной арматуры (сталь, стеклокомпозит) на прочность и деформативность бетонных образцов.
6. Методика расчета сжатых бетонных элементов, армированных стеклокомпозитной арматурой, учитывающая влияние постановки поперечной арматуры с различным шагом.
7. Результаты численного анализа и сопоставления опытных и расчетных значений прочности образцов, армированных стеклокомпозитной арматурой.

**Положения, выносимые на защиту:**

1. Результаты определения физико-механических характеристик стеклокомпозитной арматуры (прочность при растяжении, прочность при сжатии, модуль упругости при растяжении и сжатии).

2. Результаты экспериментальных исследований прочности и деформативности центрально-сжатых бетонных элементов, армированных стеклокомпозитной арматурой.

3. Методика расчета прочности сжатых бетонных элементов, армированных стеклокомпозитной арматурой, с учётом эффекта обоймы и обжатия внутреннего бетонного ядра, достигаемого за счет учащённого шага поперечной арматуры, а также на основе анализа характера работы продольной стеклокомпозитной арматуры.

4. Повышение несущей способности сжатых бетонных элементов, армированных стеклокомпозитной арматурой, связанное с шагом поперечной арматуры.

#### **Теоретическая и практическая значимость работы:**

– создание возможности повышения несущей способности сжатых бетонных элементов, армированных стеклокомпозитной арматурой за счет уменьшения шага поперечной арматуры.

– в методике расчета прочности сжатых бетонных элементов, армированных стеклокомпозитной арматурой с учётом эффекта обоймы и обжатия внутреннего бетонного ядра, достигаемого за счет уменьшения шага размещения поперечной арматуры, а также с учётом характера работы продольной стеклокомпозитной арматуры.

– реализация предложенной методики расчета при проектировании сжатых бетонных элементов, находящихся в условиях агрессивных сред, позволит использовать вместо стальной композитную полимерную арматуру в качестве рабочей продольной и поперечной, а также повысить коррозионную стойкость таких конструкций и их долговечность.

**Методология и методы исследования.** Теоретические и экспериментальные исследования автора основаны на фундаментальных положениях теории сопротивления материалов, строительной механики и механики железобетона, а также на методах геометрического, физико-механического и численного моделирования бетона и железобетона.

**Степень достоверности результатов,** полученных в ходе теоретических расчётов, подтверждены в ходе многочисленных экспериментов, в т. ч. численного моделирования. Обоснованность научных положений базируется на использовании общепринятых допущений строительной механики и теории железобетона, сопоставлении теоретических и экспериментальных исследований автора, других ученых.

**Личный вклад автора** в результаты диссертационной работы, заключается в выборе объекта и предмета исследования, в подготовке методики проведения экспериментальных исследований, в обработке результатов исследований и их анализе, в разработке инженерного метода расчета центрально-сжатых элементов с композитной полимерной арматурой; в численных расчетах сжатых бетонных элементов, армированных композитной полимерной арматурой.

#### **Внедрение результатов исследования:**

– в проектном институте ООО «ПИ2» при оценке несущей способности сжатых элементов противопожарного резервуара объёмом 2000 м.куб. для ЖК «Героев» по адресу: Московская обл., г.о. Балашиха, мкрн. Железнодорожный, ул. Автозаводская, квартал 4.

**Апробация работы.** Материалы диссертационной работы представлены на 11-й международной конференции Fiber-Reinforced Polymers in Reinforced Concrete Structures (FRPRCS-11, Гимараеш, Португалия, 2013); III Всероссийской (II Международной) конференции по бетону и железобетону «Бетон и железобетон – взгляд в будущее» (Москва, 2014); Международной конференции Betonarske Dni (Братислава, Словакия, 2014); VI Международной конференции IPICSE-2018: «Интеграция, партнерство и инновации в строительной науке и образовании»; II Scientific Conference "MODELLING AND METHODS OF STRUCTURAL ANALYSIS" (Москва, 2021).

В полном объеме диссертационная работа докладывалась на научном семинаре кафедры Железобетонных и каменных конструкций ФГБОУ ВО НИУ МГСУ (Москва, 2022).

**Публикация работы.** Материалы диссертации изложены в 9 опубликованных работах, из них 3 опубликованы в изданиях, рекомендуемых ВАК РФ, и 3 статьи в журналах, включенных в базу данных и систем цитирования Scopus и 3 статьи в сборниках трудов международных конференций.

**Структура и объём диссертации.** Диссертация состоит из введения, 4 глав, общих выводов, списка литературы из 157 наименований, в том числе 66 зарубежных источников. Общий объём работы – 166 страниц, в том числе 148 страниц основного текста, включающего 80 рисунков и 13 таблиц, 1 страницы Приложения.

## **2. ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** обоснована актуальность темы диссертационного исследования, сформулированы цели и задачи, описана научная новизна, теоретическая значимость и методы исследования, степень достоверности, апробация и структура работы.

**В первой главе** представлен обзор работ, посвященных как исследованию применения композитной арматуры в сжатых элементах, так и работе бетона при трехосном напряженно-деформированном состоянии. В ходе анализа работ установлено, что имеется недостаточное количество исследований сжатых элементов с композитной полимерной арматурой. Важным и нерешенным вопросом является использование стеклокомпозитной арматуры в качестве рабочей продольной арматуры в сжатых элементах. Тем не менее, проведенные исследования показывают, что при уменьшении шага поперечной арматуры возрастает прочность сжатых образцов. Возникает необходимость изучения влияния уменьшения шага поперечной арматуры на прочность и деформативность элементов, армированных композитной арматурой, а также разработка методики расчета таких конструкций. Для оценки полученных результатов выбрана программа конечно-элементного анализа ANSYS Mechanical.

**Во второй главе** приводится разработка методики расчета сжатых бетонных элементов, армированных стеклокомпозитной арматурой.

В основу методики положена зависимость, полученная аналитическим путём, разработанная для предсказания прочности бетона ядра колонн, обжатого уменьшенным шагом поперечной арматуры. Предложенная модифицированная модель обжатия бетона была разработана на основе известных положений теории железобетона, а также с учетом особенностей свойств композитной арматуры.

При разработке методики было выявлено, что сжатая зона бетона внутри арматурного каркаса не имеет линейный вид, как это было принято считать в предыдущих работах (Рисунок 1). В нашем случае, благодаря уменьшенному шагу поперечной арматуры в поперечном сечении элемента могут быть только 2 характерные зоны – внутри арматурного каркаса и от наружной грани колонны до внутренней грани арматурного каркаса. Внутри зоны арматурного каркаса предполагается, что бетон находится в условиях объемного НДС, в то время как в зоне снаружи каркаса НДС бетона можно охарактеризовать как одноосное сжатие.

Для определения прочности объёмно-сжатого бетонного ядра  $R_{b3}$  для квадратного сечения] получается следующая формула:

$$R_{b3} = R_b \left[ 1 + 0.75 \xi \alpha_p \left( 0.5 \bar{\sigma} + \frac{\bar{\sigma} - 2}{4} + \sqrt{\left( \frac{\bar{\sigma} - 2}{4} \right)^2 + \frac{\bar{\sigma}}{b_1}} \right) \right], \quad (1)$$

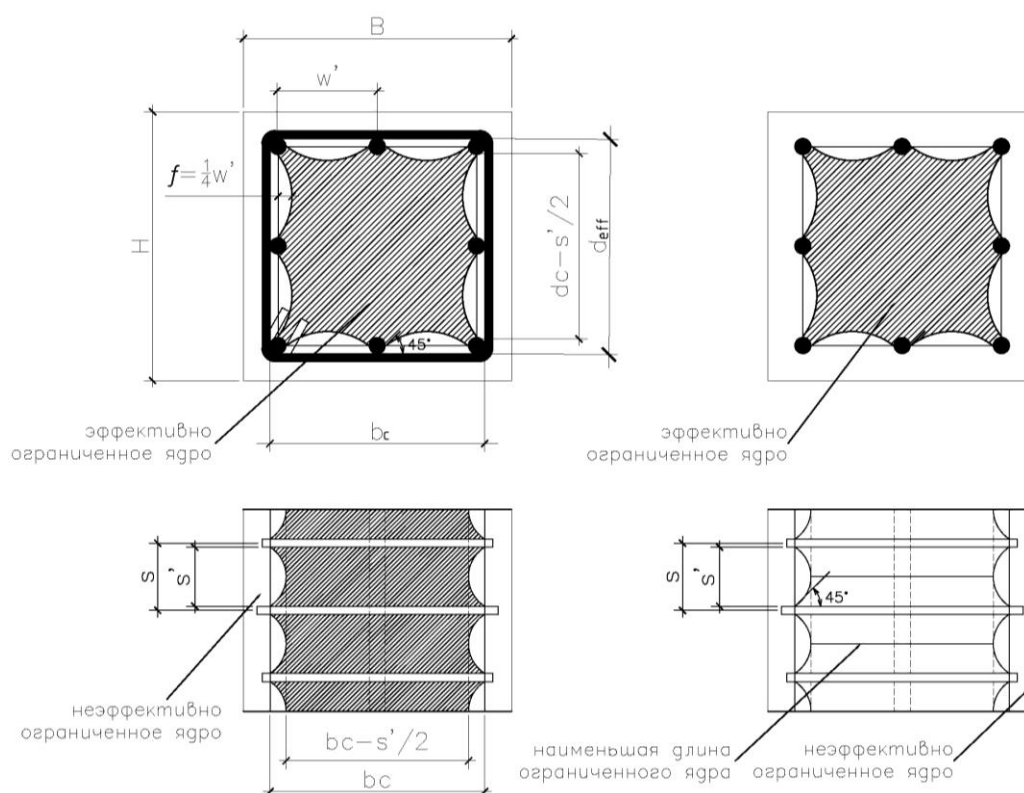


Рисунок 1 – Зона ограниченного бетона при учащенном шаге поперечной арматуры

Прочность при сжатии бетона с косвенным армированием композитными хомутами  $R_{b,3f}$  вычисляется по формуле:

$$R_{b3,f} = R_b \left[ 1 + \left( 0.5 \bar{\sigma}_{sc} + \frac{\bar{\sigma}_{sc} - 2}{4} + \sqrt{\left( \frac{\bar{\sigma}_{sc} - 2}{4} \right)^2 + \frac{\sigma_{sc}}{b_1}} \right) \right], \quad (2)$$

в которой  $\bar{\sigma}_{sc}$  - относительные радиальные напряжения внутри арматурного каркаса. Величина  $\bar{\sigma}_{sc}$  в традиционном виде определяется по формуле:



$$\sigma_{sc} = \frac{\mu_{sc} \sigma_{y,sc}}{R_b}, \quad (3)$$

где  $\sigma_{y,sc}$  - предел текучести спирали;

$\mu_{fc}$  - коэффициент косвенного армирования поперечной арматурой (хомутами).

Коэффициент косвенного армирования поперечной арматурой (хомутами) зависит от площади хомута  $A_{fc}$ , области, ограниченной диаметром спирали  $d_{eff}$  и шагом хомутов  $s$ . Рассчитывается коэффициент  $\mu_{fc}$  по формуле:

$$\mu_{fc} = \frac{2A_{fc}}{d_{eff}s}. \quad (4)$$

Формулы (3) и (4) отражают высказанное до этого предположение о том, что чем меньше шаг поперечного армирования, тем выше будут относительные радиальные напряжения внутри каркаса и, следовательно, выше будет прочность бетонного ядра.

В нашем случае, в формуле (5) вместо предела текучести стали  $\sigma_{y,sc}$  был использован предел прочности материала, из которого изготавливаются хомуты, а именно стеклокомпозитной арматуры. Композитная арматура со сгибами или в виде хомутов изготавливается только в заводских условиях и поставляется на объект в готовом виде.

Для композитных хомутов прочность стержней на сгибах критически зависит от угла наклона волокон. Данный факт нашел отражение в нормах проектирования РФ для конструкций, армированных композитной полимерной арматурой (СП295.13258002017). Так, согласно п.5.2.10 СП295.1325800.2017 расчетное значение  $R_{fw}$  сопротивления композитной полимерной арматуры растяжению при радиусе загиба хомутов из стержней диаметром  $d_{fw}$ , равном не менее  $6d_{fw}$  следует определять по формуле:

$$R_{fw} = 0.004E_f \leq 0,5R_f. \quad (5)$$

При модуле упругости стеклокомпозитной арматуры  $50000 \text{ МПа}$  в формуле (3) вместо  $\sigma_{y,sc}$  имеем не более  $R_{fw} = 200 \text{ МПа}$ .

В таком случае формула (3) будет иметь вид:

$$\sigma_{fc} = \frac{\mu_{fc} R_{fw}}{R_b}, \quad (6)$$

Общая площадь неэффективно ограниченного бетона ядра в уровне хомутов при их количестве  $n$ :

$$A_i = \sum_{i=1}^n \frac{(w_i')^2}{6}. \quad (7)$$

Было установлено, что контур эффективно ограниченного ядра не является квадратным или прямоугольным, как было принято считать ранее. Из уравнения площади квадратной параболы видно, что ордината параболы зависит от абсциссы (шаг

продольной арматуры). То есть с уменьшением расстояния между стержнями продольной арматуры уменьшается и ордината параболы. Вместе с тем сокращается площадь необжатого бетона и увеличивается площадь эффективно обжатого бетона. По вышесказанному был сделан вывод, что насыщение продольной арматурой, т.е. учащение её шага напрямую влияет на площадь эффективно ограниченного ядра, заключенного внутри хомутов, и, в результате, влияет на повышение несущей способности центрально-сжатого элемента.

Учитывая то, что граница эффективно ограниченного бетона между двумя смежными хомутами имеет форму квадратной параболы с начальным углом наклона  $45^\circ$ , отношение площади эффективно ограниченного бетона к площади ядра будет иметь вид:

$$\lambda = \frac{\left( A_{et} - \sum_{i=1}^n \frac{(w_i')^2}{6} \right)}{A_{et}}, \quad (8)$$

где  $A_{et} = b_c d_c$ .

Таким образом, площадь ограниченного бетона в сечении определяется посередине между двумя смежными хомутами:

$$A_{eml} = \left( b_c - \frac{s'}{2} \right) \left( d_c - \frac{s'}{2} \right) = b_c d_c \left( 1 - \frac{s'}{2b_c} \right) \left( 1 - \frac{s'}{2d_c} \right). \quad (9)$$

Соответственно, эффективная площадь в среднем сечении вычисляется, как:

$$A_e = \lambda b_c d_c \left( 1 - \frac{s'}{2b_c} \right) \left( 1 - \frac{s'}{2d_c} \right) = \frac{1}{b_c d_c} \left( b_c d_c - \sum_{i=1}^n \frac{(w_i')^2}{6} \right) b_c d_c \left( 1 - \frac{s'}{2b_c} \right) \left( 1 - \frac{s'}{2d_c} \right), \quad (10)$$

$$A_e = \left( b_c d_c - \sum_{i=1}^n \frac{(w_i')^2}{6} \right) \left( 1 - \frac{s'}{2b_c} \right) \left( 1 - \frac{s'}{2d_c} \right). \quad (11)$$

При этом, как было показано ранее, прочностью стеклокомпозитной арматуры не стоит пренебрегать. Используя закон Гука и принимая равными деформации бетона и арматуры ( $\varepsilon_b = \varepsilon_s$ ), а также взяв за предельное значение деформации для тяжелых бетонов  $\varepsilon_{b,ult} = 0.0035$  можно получить, что расчетное сопротивление в стеклокомпозитной арматуре может быть принято:

$$R_{fc} = \varepsilon_{b,ult} E_{fc}. \quad (12)$$

В итоге, несущая способность центрально-сжатого элемента с композитным армированием может быть представлена следующим выражением:

$$N_{ult,3f} = R_{b3,f} A_e + R_b (A - A_e) + \varepsilon_{b,ult} E_{fc} A_{fc}. \quad (13)$$

Блок-схема расчета центрально-сжатых бетонных колонн, армированных продольной и поперечной стеклокомпозитной арматурой с учетом прочности эффективно-ограниченного бетона в ядре сечения показана на Рисунке 2.

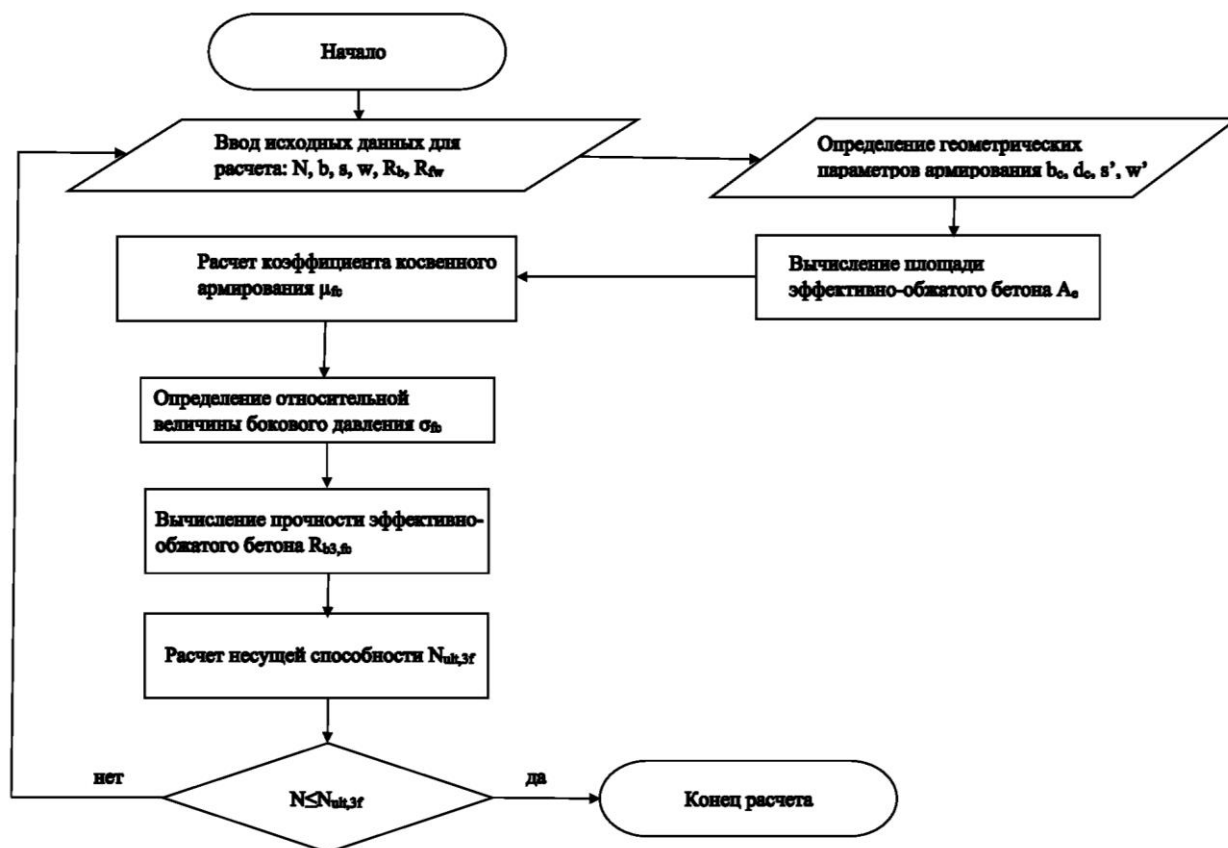


Рисунок 2 – Блок-схема расчета центрально-сжатых элементов с композитной полимерной арматурой

**Третья глава** посвящена экспериментальным исследованиям коротких бетонных колонн, армированных продольной и поперечной стеклокомпозитной арматурой. В качестве образцов испытывались короткие центрально-сжатые элементы, армированные продольной и поперечной стеклокомпозитной арматурой. Для сравнения также были испытаны образцы со стальной арматурой и чисто бетонные образцы, без армирования. Шаг хомутов в армированных образцах назначался от 50 до 500 мм для того, чтобы оценить влияние шага поперечной арматуры на прочность и деформативность образцов.

Влияние шага продольной и поперечной арматуры на прочность и деформативность сжатых элементов определялась на основании графиков зависимостей прочность-деформация, коэффициент Пуассона, коэффициент объемной деформации (Рисунки 5, 6).

По результатам проведенных исследований было установлено, что шаг продольной и поперечной арматуры значительно влияет на прочность и деформативность образцов. С уменьшением шага поперечной арматуры возрастает как прочность образцов, так и продольные деформации, поперечные деформации при этом снижаются.

Также в ходе исследований было установлено, что при разрушении образцов наблюдалось разрушение стеклокомпозитных хомутов в зоне сгибов, что подтверждает ранее высказанное предположение о влиянии прочности материала хомутов

на сгибах на прочность и деформативность сжатых элементов. В образцах с маленьким шагом поперечной арматуры зафиксировано разрушение продольной стеклокомпозитной арматуры от выпучивания под действием бокового давления бетона (Рисунки 3, 4). По результатам испытаний было установлено, что несущая способность колонн, армированных стеклокомпозитной арматурой всего на 9,6% ниже несущей способности колонн, армированных стальной горячекатаной арматурой класса А500. Образцы с наименьшим шагом поперечной арматуры показали более пластичное поведение. Напротив, образцы с шагом поперечной арматуры близким к значениям, рекомендуемым нормами проектирования или выше, показали хрупкое поведение, близкое к чисто бетонным образцам без армирования.

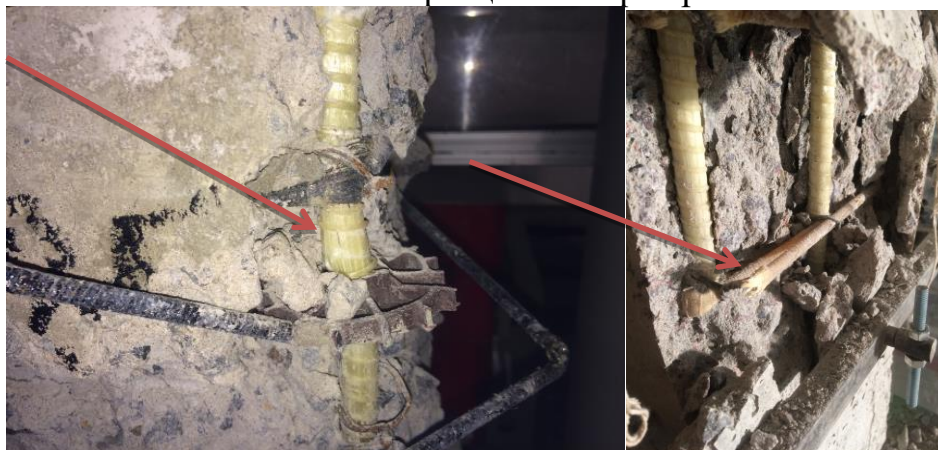


Рисунок 3 – Разрушение от выпучивания под действием бокового давления продольной и поперечной стеклокомпозитной арматуры



Рисунок 4 – Разрыв поперечной стеклокомпозитной арматуры (хомутов)

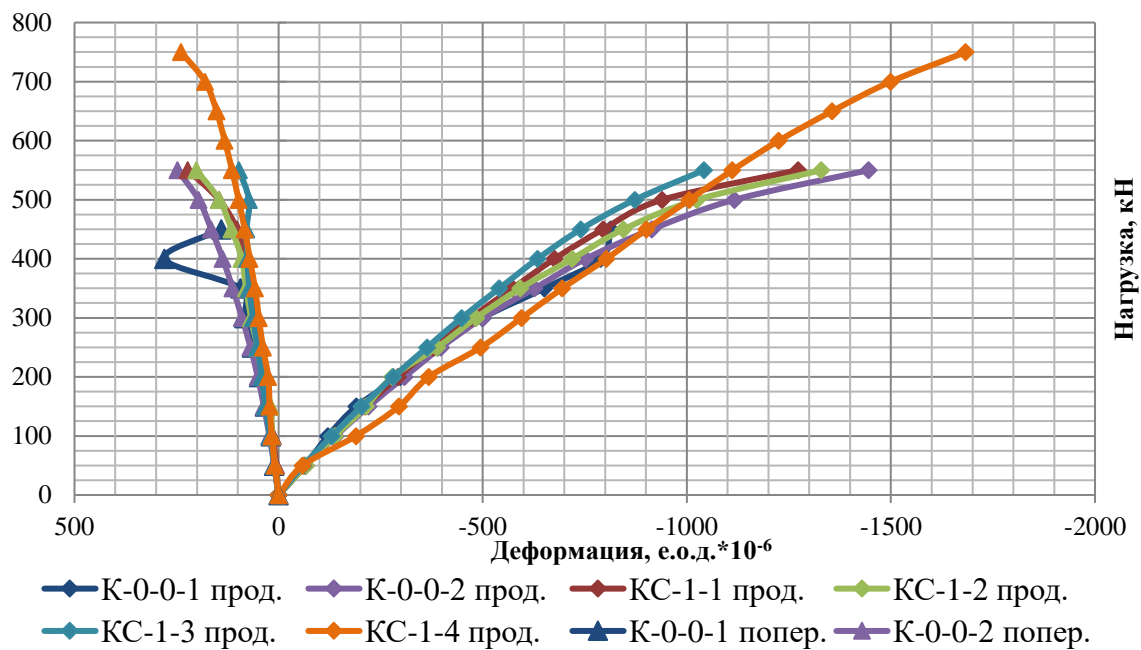


Рисунок 5 – Диаграмма нагрузка-средняя деформация по тензорезисторам по образцам К и КС-1 1-й серии

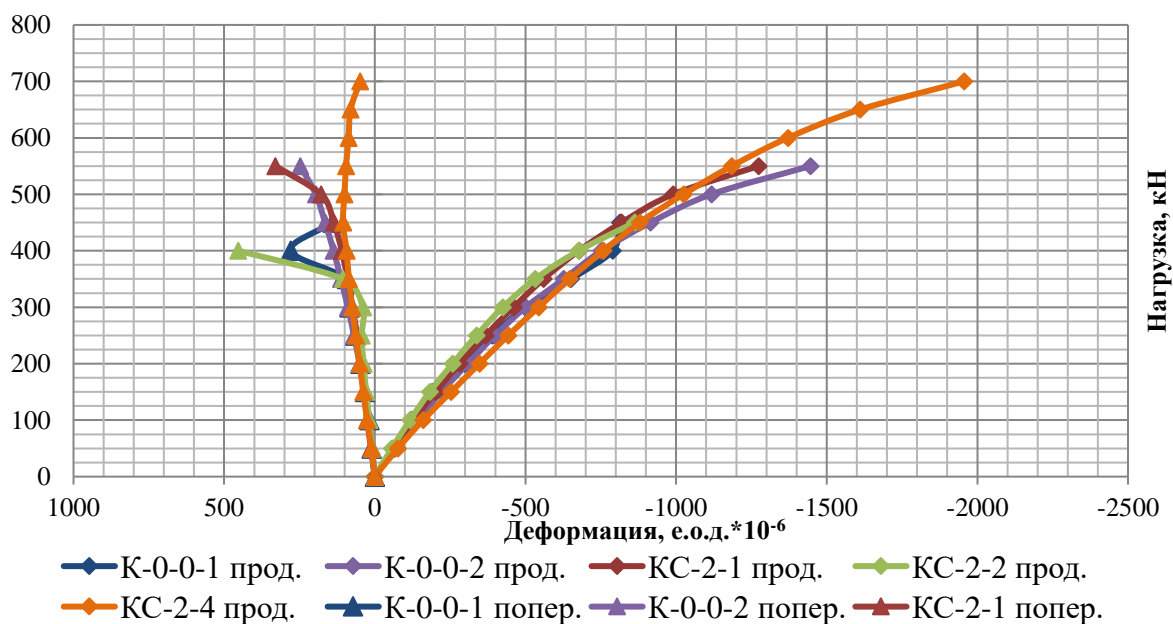


Рисунок 6 – Диаграмма нагрузка-средние деформации по тензорезисторам по образцам К и КС-2 1-й серии

Одной из особенностей поведения образцов под нагрузкой можно отметить более позднее образование больших значений быстро натекающих (неупругих) продольных деформаций при выдержке у образцов, армированных стальной арматурой по сравнению с образцами из чистого бетона (без армирования) и армированных стеклокомпозитной арматурой. Из Рисунков 7,8 хорошо заметно, что наибольшие значения деформаций ползучести у образцов без армирования или с большим шагом поперечной арматуры. Это объясняется сдерживающим деформации арматурным каркасом, и чем более он насыщен продольной и поперечной арматурой, тем более эффективно сдерживает продольные и поперечные деформации.

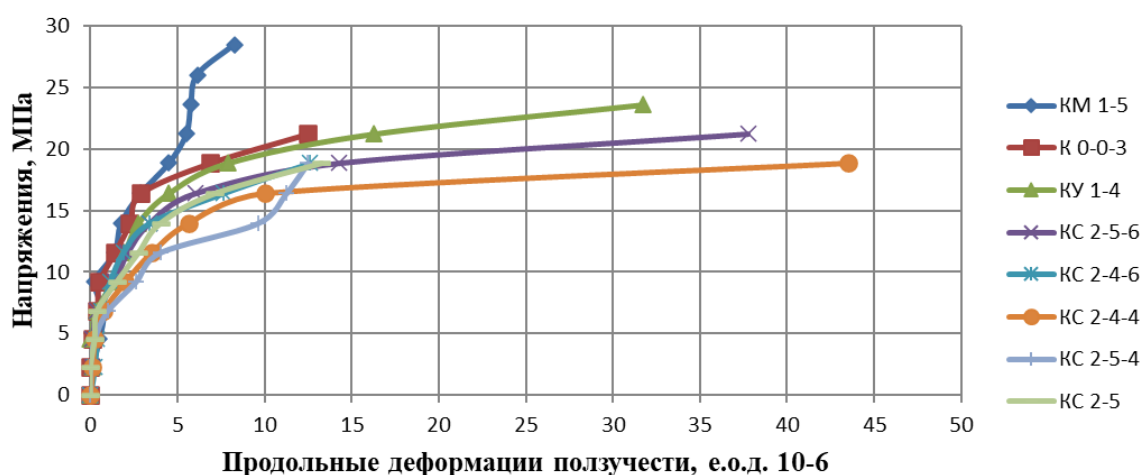


Рисунок 7 – Диаграмма напряжения-продольные деформации ползучести

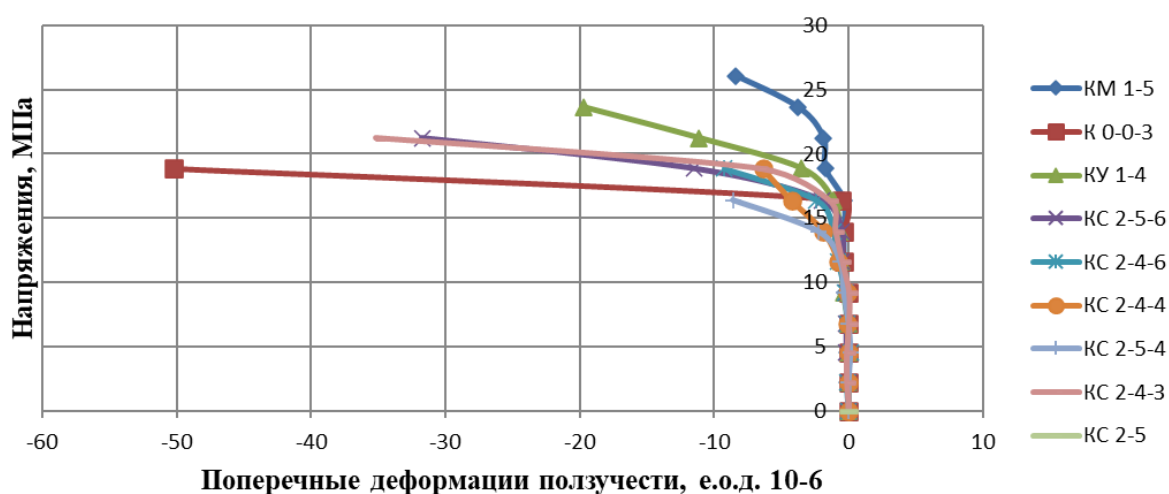


Рисунок 8 – График напряжения-поперечные деформации ползучести

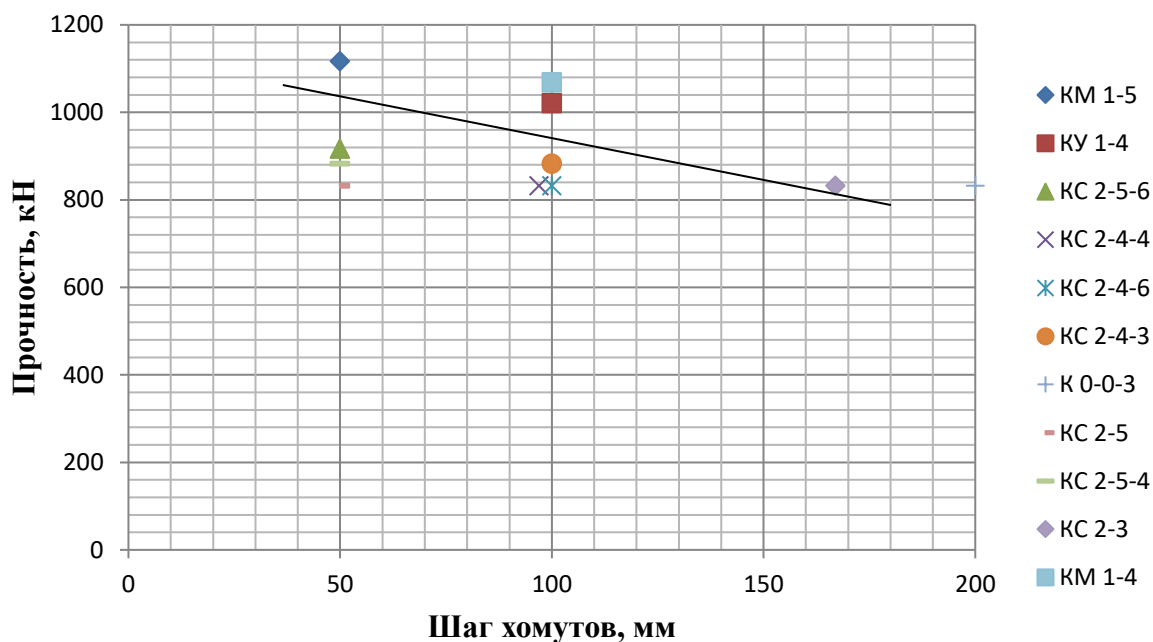


Рисунок 9 – Зависимость прочности образцов 2-й серии от шага хомутов

**В четвёртой главе** диссертации выполнен нелинейный статический расчет конечно-элементных моделей колонн, с армированием стеклокомпозитной арматурой. Конечно-элементные модели образцов собирались в пре/постпроцессоре ANSYS Mechanical (Рисунок 10). В качестве решателя использовался стандартный встроенный решатель.

Для учета нелинейной работы бетона применялась модель пластичности Друкера-Прагера. Армирующим материалам из композитных материалов механические свойства задавались как ортотропным материалам, а ориентация элементов исходя из направления волокон материала – вдоль оси стержней.

Точность полученной КЭ модели проверялась на натуральных испытаниях опытных образцов. В работе приведены результаты сравнения КЭ модели с результатами опытных образцов, выполненных в рамках диссертации.

При анализе результатов исследований конечноэлементных моделей, в качестве критерия разрушения опытных образцов была принята максимальная суммарная реакция в опорах от продольной силы, приложенной к верхней грани колонны.

Было замечено, что образцы с меньшим шагом продольной и поперечной арматуры имеют пластический характер разрушения, как было зафиксировано и при экспериментальных исследованиях. По результатам численных экспериментов можно отметить хорошую сходимость результатов численного моделирования и экспериментальных данных (Таблица 1, Рисунок 12).

По результатам численного моделирования видно (Рисунок 13), что наибольшие напряжения и деформации, и в конечном счете, разрушения в поперечной арматуре возникают в угловых зонах, в месте сгиба хомутов. Это подтверждает результаты как испытаний натуральных образцов, в которых при разрушении наблюдался разрыв хомутов именно на сгибах, так и ранее высказанную гипотезу о зависимости прочности бетонных колонн от прочности материала хомутов.

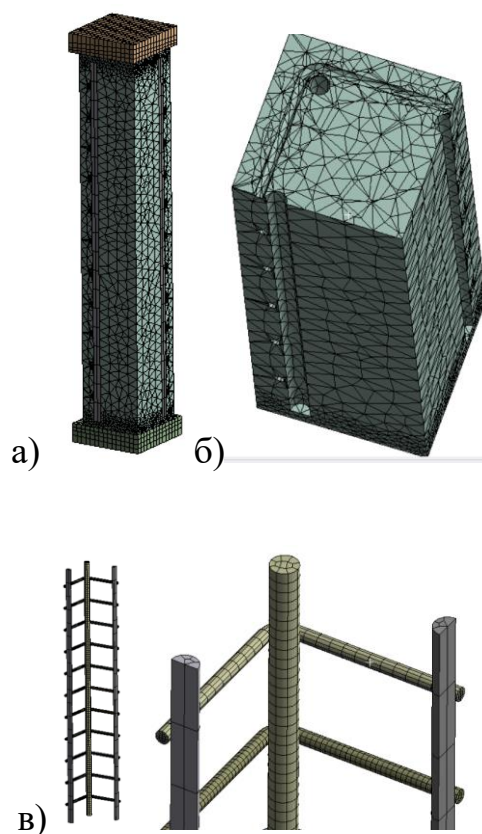


Рисунок 10 – Вид конечно-элементной модели а) всей модели, б) бетона, в) армирующих элементов

Таблица 1 – Результаты сопоставления опытных и расчетных разрушающих нагрузок центрально сжатых бетонных образцов квадратного сечения, армированных стеклокомпозитной арматурой

№ п/п	Образец	$N^{экс}$ , кН	$N^{МКЭ}$ , кН	$\frac{N^{экс} - N^{МКЭ}}{N^{экс}} 100\%$
1	К 0-0-3	849,6	840	+1,1
2	КС 2-3	849,6	876	-3,1
3	КС 2-4-6	901,3	826,75	+8,3
4	КС 2-4-3	901,3	826,75	+8,3
5	КС 2-4-4	849,6	779,33	+8,3
6	КУ 1-4	1042,3	972	+6,7
7	КМ 1-4	1091	1016	+6,9
8	КМ 1-5	1140	1038	+9,0
9	КС 1-5	1042,2	956	+8,3
10	КС 2-5	993,6	911,42	+8,3
11	КС 2-5-4	901,3	826,75	+8,3
12	КС 2-5-6	936,5	859,04	+8,3



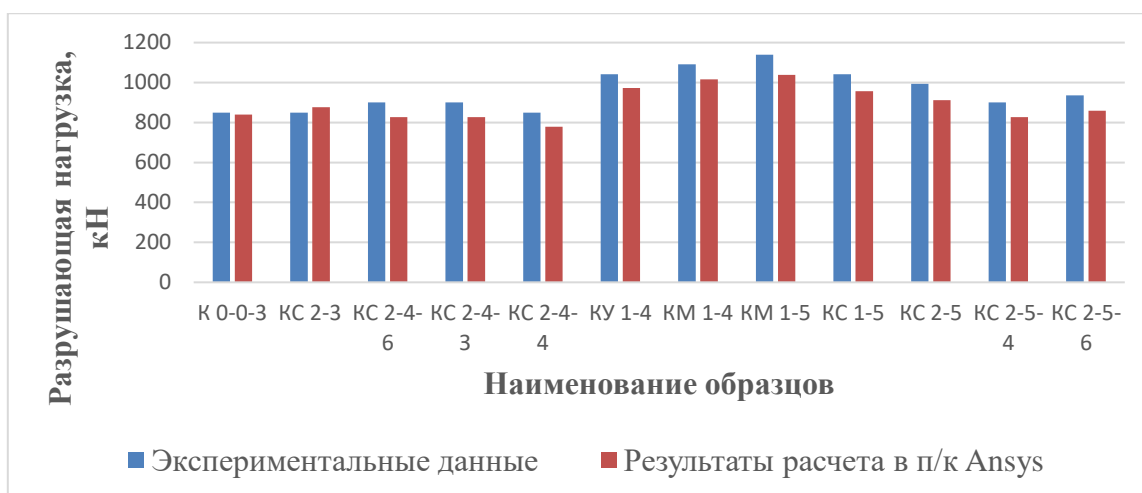


Рисунок 11 – Сравнение результатов численного моделирования с экспериментальными данными

Для оценки влияния шага поперечной арматуры на рост прочности образцов на сжатие были проанализированы результаты численного моделирования, из которых следует, что с уменьшением шага постановки поперечных стержней увеличивается разрушающая нагрузка. Наибольшую разрушающую нагрузку имели образцы с наименьшим шагом поперечной арматуры – 50 мм, как и в результатах экспериментальных испытаний.

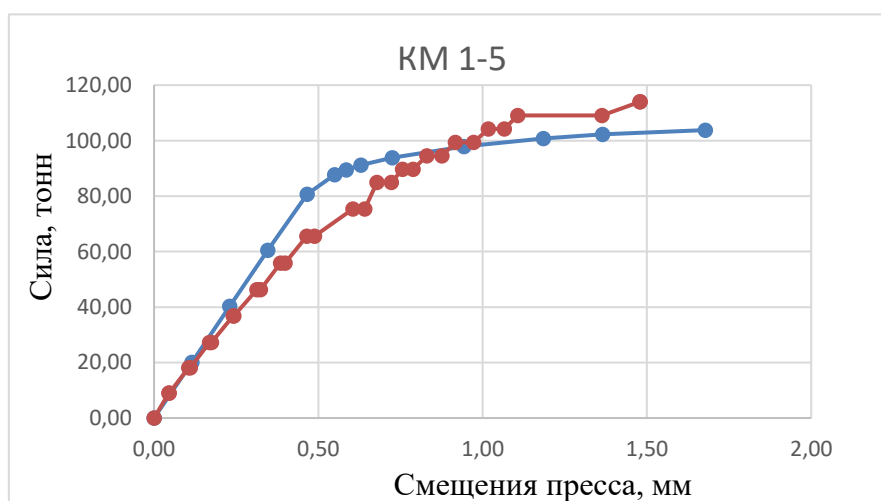


Рисунок 12 – Диаграмма деформирования. Образец КМ 1-5

G: 21  
Equivalent Plastic Strain 2  
Type: Equivalent Plastic Strain  
Unit: m/m  
Time: 0,85  
30.01.2022 23:06

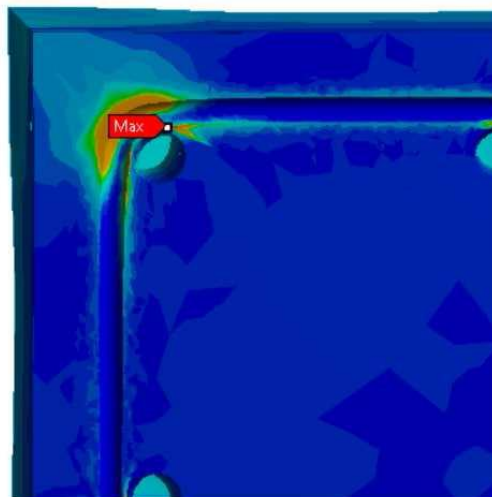
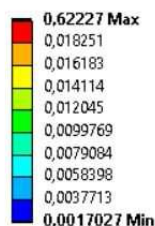


Рисунок 13 – Пластические деформации хомутов в образце КС 1-5

На основании разработанной методики расчета, были определены теоретические разрушающие значения нагрузок  $N_{\text{теор}}$  для различных образцов, испытанных на центральное сжатие отечественными и зарубежными исследователями. Результаты обобщенного сравнения опытных и рассчитанных по предложенной методике определения разрушающих нагрузок представлены на Рисунке 14.

Анализируя результаты испытаний, установлено, что, образцы с маленьким шагом продольной и поперечной арматуры оказываются недооцененными по несущей способности, в то время как образцы с расположением арматуры согласно требованиям норм оказываются переоцененными. Полученные результаты свидетельствуют о хорошем совпадении теории и практики. Все эти результаты подтверждают достоверность предлагаемых расчетных методов.

Предложенные методы определения прочности центрально-сжатых колонн, армированных стеклокомпозитной арматурой, позволяют с достаточной для практических целей точностью решать данную задачу как со стеклокомпозитной, так и с другими видами неметаллической арматуры.

В качестве примера расчета в четвёртой главе рассмотрена железобетонная колонна среднего ряда прямоугольного резервуара для воды из типового проекта 901-4-63.83 «Резервуары для воды прямоугольные железобетонные сборные емк. от 12000 до 20000 м<sup>3</sup> с применением изделий промзданий».

На Рисунках 15-17 показан график зависимости прочности эффективно-обжатого ядра сечения бетона в зависимости от шага поперечной арматуры, коэффициента косвенного армирования и величины относительного бокового давления на примере расчета колонн типового проекта ТП 901-4-63.83. Из анализа графиков очевидно, что с уменьшением шага поперечной арматуры прочность эффективно-обжатого бетона возрастает, причем с уменьшением шага прочность возрастает стремительнее. При этом можно отметить, что у образцов с композитным армированием (КС) прочность остается немного ниже, за счет более низких значений прочности хомутов на сгибах. Зависимость можно охарактеризовать как нелинейную, что хорошо коррелируется с результатами экспериментальных исследований.

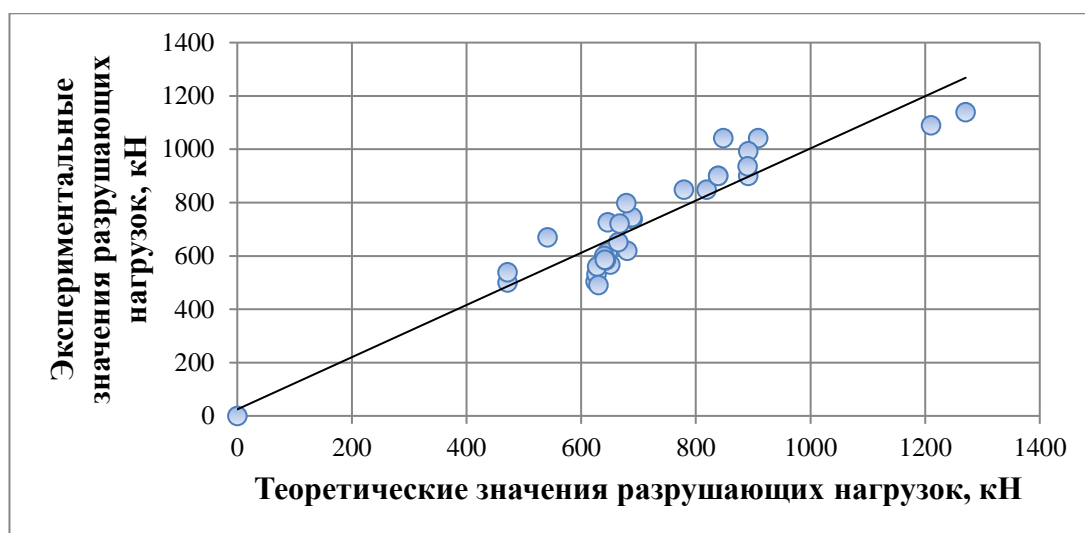


Рисунок 14 – Сопоставление расчетных и экспериментальных данных

С увеличением коэффициента косвенного армирования и величины относительного бокового давления за счет учащения шага продольной и поперечной арматуры, прочность эффективно обжатого ядра также возрастает, но уже линейно. Из графиков можно заметить, что прочность эффективно-обжатого ядра бетона у образцов с композитным армированием также несколько меньше.

Замечено, что значения шага поперечной арматуры, близкие к рекомендуемым нормами проектирования, практически не дают увеличения прочности внутреннего ядра сечения бетона и не позволяют получить эффективно обжатый бетон внутри арматурного каркаса, что и подтвердилось в ходе экспериментов некоторых авторов. Необходимо уменьшение шага поперечной арматуры, то есть более высокие значения коэффициента поперечного армирования ( $>0,002$ ).

Из анализа данных видно, что коэффициент упрочнения колонн (по отношению к чисто бетонному образцу без армирования) увеличивается с учащением поперечного армирования. При этом расчетная прочность колонн со стеклокомпозитной арматурой на 10% меньше, чем у аналогичных колонн со стальной арматурой. Это с точностью подтверждает экспериментальные данные.

Результаты расчетов показывают, что в колоннах при шаге поперечной арматуры 50 мм, коэффициент упрочнения бетона достигает 1,09...1,23, что хорошо коррелируется со значениями коэффициента перехода от двухосной прочности бетона к трехосной  $\beta=1,15...1,2$ , подтвержденного экспериментальными данными.

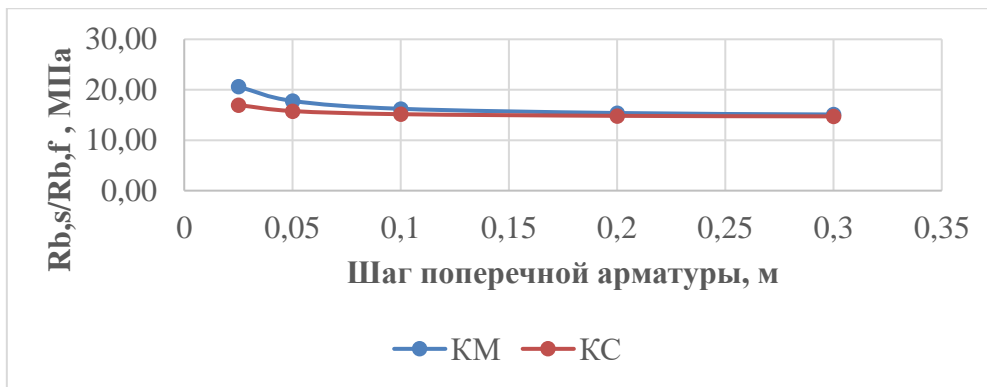


Рисунок 15 – График зависимости прочности эффективно-обжатого ядра сечения бетона в зависимости от шага поперечной арматуры

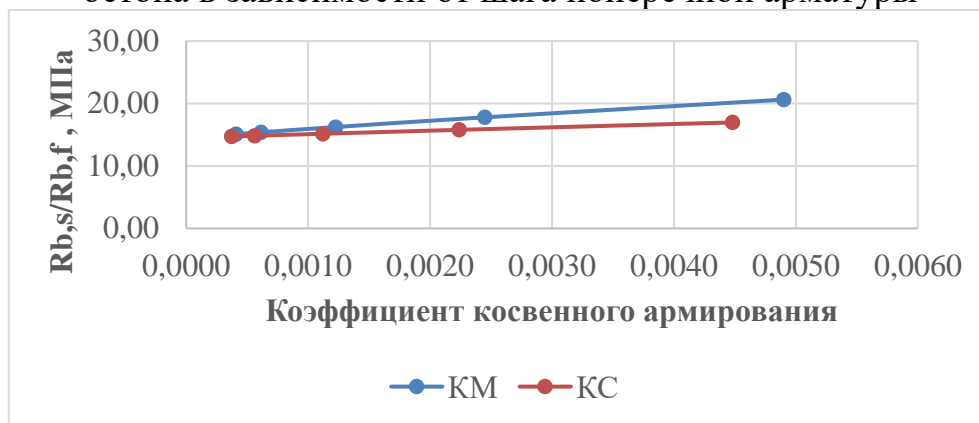


Рисунок 16 – График зависимости прочности эффективно-обжатого ядра сечения бетона в зависимости от коэффициента косвенного армирования

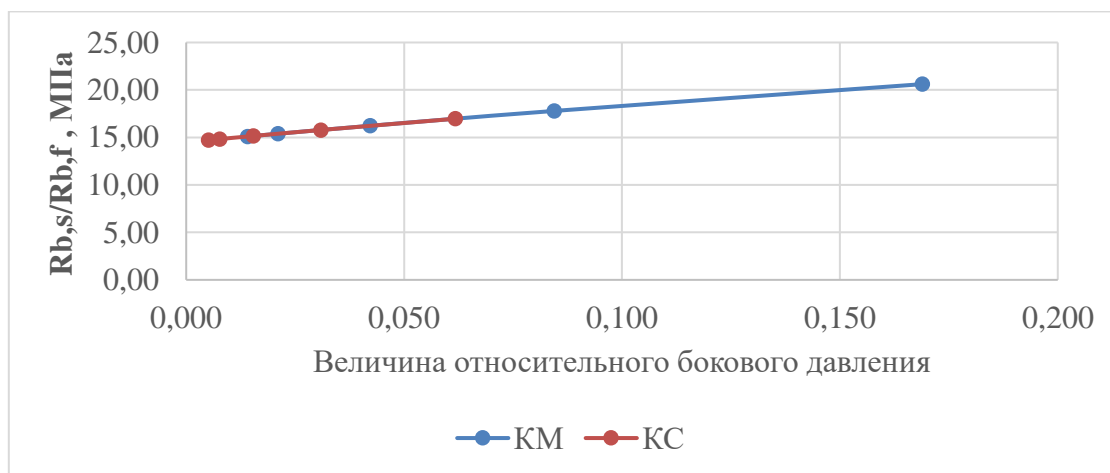


Рисунок 17 – График зависимости прочности эффективно-обжатого ядра сечения бетона в зависимости от величины относительного бокового давления

### 3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании проведенного исследования сделаны следующие общие выводы:

1. Экспериментально и аналитически установлено, что существует взаимосвязь между предельной продольной силой, воспринимаемой сжатыми железобетонными элементами, и шагом продольной и поперечной арматуры, а также материалом поперечной арматуры.

2. Разработанная методика расчета железобетонных сжатых элементов, армированных стеклокомпозитной арматурой, основана на теории прочности железобетона при трехосном напряженном состоянии. В методике учитываются основные особенности напряженно-деформированного состояния эффективно-обжатого ядра сечения, шаг продольной и поперечной арматуры, а также материал армирования и влияние радиуса загиба хомутов на прочность элементов.

3. Несущая способность колонн, армированных стеклокомпозитной арматурой всего на 9,6% ниже несущей способности колонн, армированных стальной горячекатаной арматурой класса А500.

4. Уменьшение шага хомутов положительно влияет на прочность сжатых элементов, армированных стеклокомпозитной арматурой, повышая их несущую способность.

5. Низкие значения процента поперечного армирования колонн, т.е. с шагом хомутов согласно требованиям норм проектирования, не дают увеличения несущей способности образцов, армированных стеклокомпозитной арматурой.

6. Минимальные проценты продольного и поперечного армирования указанные в нормах проектирования для колонн, армированных стеклокомпозитной арматурой, должны быть выше, чем для традиционных железобетонных колонн со стальной арматурой.

7. По результатам экспериментально-теоретических исследований разработана методика расчета сжатых элементов, армированных стеклокомпозитной арматурой, с учётом шага поперечного армирования.

#### **Рекомендации и перспектива дальнейшей разработки темы**

На основании результатов исследований, приведенных в данной работе, разработана перспектива дальнейшего исследования стеклокомпозитной арматуры в сжатых элементах.

1) Исследования внецентренно-сжатых бетонных элементов, армированных стеклокомпозитной арматурой, с большими и малыми эксцентриситетами, в т.ч. прямоугольного и круглого сечения.

2) Исследования колонн, армированных стеклокомпозитной арматурой, на длительное действие нагрузки.

В выполненной диссертационной работе достигнута цель исследования и решены поставленные задачи.

#### **4. ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

##### **Публикации в изданиях, включенных в Перечень рецензируемых научных изданий:**

1. Лапшинов, А.Е. Исследование работы СПА и БПА на сжатие // Вестник МГСУ. 2014. № 1. С. 52-57.
2. Лапшинов, А.Е. Перспективы применения неметаллической композитной арматуры в качестве рабочей ненапрягаемой в сжатых элементах // Вестник МГСУ. 2015. № 10. С. 96-105.
3. Лапшинов, А.Е., Тамразян, А.Г. К влиянию поперечного армирования на прочность и деформативность сжатых бетонных элементов, армированных композитной полимерной арматурой // Строительство и реконструкция. 2018. № 4 (78). С. 20-30.

##### **Статьи, опубликованные в журналах, индексируемых в международных реферативных базах Scopus:**

4. Lapshinov, A., Deminov, P. Comparative deformability of compressive members reinforced with steel and gfrp reinforcement // MATEC Web of Conferences 2018. С. 02036.
5. Lapshinov A.E., Gorbunov I.A., Kakusha V.A. Strength investigation of short concrete columns reinforced with GFRP reinforcement. AIP Conference Proceedings 2023 2497, 020052. <https://doi.org/10.1063/5.0103508>.
6. Lapshinov A.E., Tamrazyan A.G. Strength model for calculating centrally compressed concrete elements with composite reinforcement, taking into account the spacing of stirrups // International Journal for Computational Civil and Structural Engineering, 2022 18(2) 163–174. DOI:10.22337/2587-9618-2022-18-2-163-174.

##### **Статьи, опубликованные в других научных журналах и изданиях:**

7. Lapshinov, A.E., Madatyan, S.A. Concrete columns reinforced with GFRP and BFRP // 11th International Conference on Fiber Reinforced Polymers in Reinforced Concrete Structures. Guimaraes, Portugal. 2013.
8. Lapshinov, A.E. The prospects of use of FRP reinforcement // 5 Post kongresove kolokvium SNK fib Zbornik prednasok. Betonarske Dni 2014 Bratislava, Slovakia.
9. Лапшинов, А.Е., Мадатян, С.А. Бетонные колонны, армированные стеклопластиковой и базальтопластиковой арматурой // В сборнике: Бетон и железобетон - взгляд в будущее. Научные труды III Всероссийской (II Международной) конференции по бетону и железобетону: в 7 томах. 2014. С. 52-57.