

На правах рукописи



Евдокимова Татьяна Сергеевна

**НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ И РАСЧЕТ
ПРОЧНОСТИ КОСОСЖИМАЕМЫХ ФИБРОЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ
ЭЛЕМЕНТОВ**

Специальность 05.23.01 – Строительные конструкции, здания и сооружения

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2017

Работа выполнена в ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет».

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор,
член-корреспондент РААСН
Морозов Валерий Иванович

Официальные оппоненты: **Соколов Борис Сергеевич**
доктор технических наук, профессор,
член-корреспондент РААСН, АО «Казанский
Гипронииавиапром», республика Татарстан,
г. Казань, научный консультант;

Талантова Клара Васильевна
доктор технических наук, доцент, ФГБОУ
ВО «Петербургский государственный уни-
верситет путей сообщения Императора
Александра I», профессор кафедры строи-
тельных конструкций

Ведущая организация: ФГБОУ ВО «Белгородский
государственный технологический универ-
ситет имени В.Г. Шухова»

Защита диссертации состоится «20» сентября 2017 г. в 16⁰⁰ часов на за-
седании диссертационного совета Д **212.223.03** при ФГБОУ ВО «Санкт-
Петербургский государственный архитектурно-строительный университет»
по адресу: 190005, г. Санкт-Петербург, 2-я Красноармейская ул., д. 4, зал за-
седаний диссертационного совета (аудитория 219).

Тел./ Факс: (812) 316-58-72; E-mail: rector@spbgasu.ru

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Санкт-
Петербургский государственный архитектурно-строительный университет» и
на сайте <http://dis.spbgasu.ru/specialtys/personal/evdokimova-tatyana-sergeevna>.

Автореферат разослан «___» _____ 2017 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
доктор технических наук,
профессор

Кондратьева Лидия Никитовна

I. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность исследования. С появлением уникальных зданий и сооружений, в которых конструкции испытывают сложное напряженное состояние, возрастает необходимость в использовании конструкционных материалов, обладающих высокой прочностью, жесткостью, а также склонностью к пластическому характеру разрушения. Одним из перспективных направлений в повышении прочностных и жесткостных свойств железобетонных конструкций является использование армирования стальными фибрами.

Использование стальной фибры в железобетонных элементах позволяет повысить не только несущую способность этих элементов, но и предельную растяжимость бетона, увеличивает трещиностойкость, ударопрочность, морозостойкость, жесткость, долговечность конструкции, позволяет в отдельных случаях уменьшить расход рабочей и конструктивной арматуры, повышает пластичность при работе и вязкость при разрушении. Все это обеспечивает его высокую технико-экономическую эффективность, и обуславливает область применения сталефиброжелезобетонных (далее фиброжелезобетонных) конструкций.

Множество строительных и в особенности железобетонных конструкций в реальных условиях испытывают сложное напряженно-деформированное состояние (НДС), в которых неучет при проектировании тех или иных факторов может привести к нежелательным последствиям и даже к аварийной ситуации. Расчет железобетонных конструкций на сложные виды деформаций осуществляется по действующим нормативным документам СП 63.13330-2012 и пособию к СП 52-101-2003, тогда как рекомендации по расчету фиброжелезобетонных элементов на сложные виды деформаций, в том числе и на косоое внецентренное сжатие, в действующих нормах отсутствуют. Это в свою очередь осложняет процесс проектирования таких конструкций, как колонны, стойки мостов, эстакад, инженерных сооружений, а зачастую и вовсе делает это невозможным.

Имеющиеся в научной литературе сведения об исследовании кососжимаемых фиброжелезобетонных конструкций встречаются лишь среди зарубежных источников и носят разрозненный характер. В связи с этим актуальным направлением исследований является разработка метода расчета таких конструкций.

Степень разработанности темы исследования

Проблеме исследования железобетонных конструкций, работающих в условиях косоого внецентренного сжатия, посвящено сравнительно немного научных публикаций, подготовленных как отечественными, так и зарубежными специалистами. К их числу можно отнести М.С. Торяника, П.Ф. Вахненко, В.И. Бабича, Ю.М. Руденко, С.И. Глазера, А.С. Залесова, В.И. Клименко, К.Н. Ратушинского, Д.А. Семенова, С.Д. Семенюка, А.Х. Уначева, Д.Ю. Саркисова, В.С. Плевкова, И.И. Гольденבלата и Э.Г. Ратца, Grasser E., Linse D. и некоторых других специалистов.

Существуют различные подходы для построения расчета таких конструкций. Наиболее распространенным является уже традиционный метод расчета по предельным состояниям, известный еще с 50-ых годов 20-го века по работам М.С. Торьяника и его сотрудников. В основе этого метода лежат три уравнения предельного равновесия и дополнительная экспериментально-теоретическая зависимость (для случая малых эксцентриситетов) для определения напряжения в растянутом (менее сжатом) арматурном стержне, принятая как при плоском сжатии.

В последние годы, благодаря работам В.М. Бондаренко, Н.И. Карпенко, В.И. Колчунова, Вл.И. Колчунова, В.И. Римшина, Б.С. Соколова, А.Г. Тамразяна, В.С. Федорова, появились методы расчета, основанные на нелинейной деформационной модели, учитывающей диаграммы деформирования материалов, приближенных к реальным диаграммам. Результаты расчетов по данным методам имеют хорошее согласие с результатами экспериментальных исследований. Что же касается кососжимаемых фиброжелезобетонных элементов, то в действующих нормах по сталефибробетонным конструкциям отсутствуют методики расчета на такой вид деформации.

В зарубежных источниках встречаются теоретические и экспериментальные исследования фиброжелезобетонных конструкций на косо внецентренное сжатие, однако в представленных исследованиях не учитываются некоторые особенности поведения сталефибробетона (далее фибробетона), в частности, его работа в растянутых зонах, и нет четкого представления о поведении больших и малых эксцентриситетов.

На основании вышеизложенного для решения поставленной задачи о разработке метода расчета фиброжелезобетонных элементов, работающих в условиях косо внецентренного сжатия, сформулированы следующие цель и задачи.

Цель и задачи исследования

Целью диссертационной работы является экспериментально-теоретические исследования напряженно-деформированного состояния и разработка практического метода расчета прочности коротких фиброжелезобетонных элементов на косо внецентренное сжатие.

Для достижения поставленной цели решались следующие **задачи**.

1. Исследовать прочностные и деформативные свойства сталефибробетона при простом (одноосном) напряженном состоянии.
2. Получить зависимости предельной растяжимости сталефибробетона и коэффициента k_{fbt} , учитывающего работу растянутого фибробетона на нисходящей ветви, от процента фибрового армирования в диапазонах, применяемых на практике.
3. Провести численные и физические эксперименты фиброжелезобетонных элементов в условиях косо внецентренного сжатия.
4. Получить зависимости напряжения в растянутой (менее сжатой) арматуре от эксцентриситетов приложения силы и от коэффициента армирования продольной арматуры.

5. Разработать метод расчета негибких кососжимаемых фиброжелезобетонных элементов по первой группе предельных состояний.

Объектом исследования являются короткие кососжимаемые фиброжелезобетонные колонны прямоугольного сечения при кратковременном нагружении.

Предметом исследования является напряженно-деформированное состояние и процессы трещинообразования и разрушения фиброжелезобетонных стоек при кратковременном косом сжатии.

Область исследования в соответствии с паспортом специальности ВАК 05.23.01 – Строительные конструкции, здания и сооружения, относится к области исследования, предусмотренного пунктом 3. Создание и развитие эффективных методов расчета и экспериментальных исследований вновь возводимых, восстанавливаемых и усиливаемых строительных конструкций, наиболее полно учитывающих специфику воздействий на них, свойства материалов, специфику конструктивных решений и другие особенности.

Научная новизна исследования заключается в следующем.

1. Получены зависимости для определения предельной растяжимости фибробетона и коэффициента k_{fbr} , учитывающего работу растянутого фибробетона на нисходящей ветви, от объемного процента фибрового армирования в диапазонах, применяемых на практике.
2. Экспериментально доказана эффективность использования металлической фибры в железобетонных элементах, работающих в условиях косого внецентренного сжатия. Получены новые опытные данные о напряженно-деформированном состоянии и процессе трещинообразования и разрушения таких элементов.
3. Получена зависимость напряжения в растянутой (менее сжатой) арматуре от эксцентриситетов приложения силы и от коэффициента армирования продольной арматуры на основании результатов численного эксперимента.
4. Разработаны метод расчета по первой группе предельных состояний коротких кососжимаемых фиброжелезобетонных элементов с использованием реальных диаграмм деформирования материалов в сжатой и растянутой зонах, реализуемый с помощью нелинейного расчета, и метод расчета, основанный на упрощенном представлении характера деформирования материалов, выполненный инженерным методом.

Теоретическая значимость работы заключается в разработке теоретических положений, алгоритмов и методов расчета, совокупность которых обеспечивает возможность оценки характера напряженно-деформированного состояния кососжимаемых фиброжелезобетонных элементов на различных стадиях, включая стадию предельного состояния.

Практическая значимость работы заключается в разработке практического метода расчета кососжимаемых фиброжелезобетонных элементов, который использовался при проектировании опытной партии фиброжелезо-

бетонных колонн, работающих в условиях косо́го внецентренного сжатия, что подтверждается актом о внедрении ЗАО «Экспериментальный завод».

Методология и методы диссертационного исследования обеспечиваются использованием теоретических и экспериментальных данных, полученных отечественными и зарубежными учеными в области изучения железобетонных и фиброжелезобетонных конструкций, а также методами научных исследований, базирующихся на принципах строительной механики и современной теории железобетона.

Положения, выносимые на защиту.

1. Результаты экспериментальных исследований фибробетонных элементов с предлагаемыми на современном отечественном рынке фибрами и применимым объемным процентом армирования в условиях осевого сжатия и растяжения.
2. Результаты экспериментальных исследований железобетонных и фиброжелезобетонных стоек, работающих в условиях косо́го внецентренного сжатия.
3. Результаты численного эксперимента фиброжелезобетонных стоек, работающих в условиях косо́го внецентренного сжатия
4. Алгоритмы и методы расчета прочности фиброжелезобетонных элементов на основе нелинейной деформационной модели и по предельным усилиям.

Степень достоверности результатов диссертационной работы обеспечивается применением стандартных методик испытаний, использованием метрологически аттестованного лабораторного испытательного оборудования и измерительных приборов, применением общепринятых гипотез и допущений, удовлетворительным согласием результатов экспериментальных и теоретических исследований.

Апробация работы.

Результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на всероссийских и международных конференциях:

- на 70-й научной конференции профессорско-преподавательского состава СПбГАСУ (2014 год, СПбГАСУ);
- на III конференции Международного конгресса «Актуальные проблемы современного строительства» (2014 год, СПбГАСУ);
- на 68-й международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Актуальные проблемы современного строительства», посвященной 110-летию Хомуцецкого Н.Ф. (2015 год, СПбГАСУ);
- на 71-й научной конференции профессорско-преподавательского состава СПбГАСУ (2015 год, СПбГАСУ);
- на международной конференции «Долговечность, прочность и механика разрушения бетона, железобетона и других строительных материалов». – Санкт-Петербург (2016 год, СПбГАСУ).

Публикации. Материалы диссертации опубликованы в 10 печатных работах, общим объемом 3,318 п.л., лично автором – 2,643 п.л., в том числе 4 работы опубликованы в изданиях, входящих в перечень ведущих рецензируемых научных журналов, утвержденный ВАК РФ.

Структура и объем диссертационной работы. Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения, приложения, списка литературы из 159 наименований, в том числе 21 зарубежных источников. Работа представлена на 150 страницах, содержит 60 рисунков, 7 таблиц и 11 страниц приложения.

Во введении сформулирована проблема и обоснована актуальность проводимых исследований, представлены степень разработанности, цель и задачи исследования, научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы, степень достоверности результатов и апробация работы.

В первой главе приведен анализ литературных данных по теме диссертации, рассмотрено состояние вопроса исследований кососжимаемых железобетонных и фиброжелезобетонных элементов. Выявлены параметры, оказывающие основное влияние на несущую способность кососжимаемых железобетонных элементов. Рассмотрены случаи положения нейтральной линии в зависимости от приложения нагрузки для таких элементов.

Во второй главе приведены экспериментальные исследования бетонных и фибробетонных образцов при сжатии и растяжении. Получены зависимости предельной растяжимости фибробетона ε_{fbtu} и коэффициента k_{fbi} , учитывающего величину снижения напряжения фибробетона в растянутой зоне на нисходящей ветви, от объемного процента фибрового армирования в диапазонах, применяемых на практике.

В третьей главе представлены результаты физического эксперимента коротких железобетонных и фиброжелезобетонных стоек на косое внецентренное сжатие. Получены данные о характере трещинообразования и разрушения опытных образцов. Представлены результаты численного эксперимента фиброжелезобетонных стоек на косое внецентренное сжатие, выполненного в программном комплексе ЛИРА-САПР 2013.

В четвертой главе представлен метод расчета кососжимаемых фиброжелезобетонных элементов с использованием нелинейной деформационной модели, а также расчет по методу предельных состояний. При расчете по методу предельных состояний для случая малых эксцентриситетов одних уравнений равновесия недостаточно. Необходимы дополнительные условия, представляющие собой, по сути, уравнения совместности деформаций, построенные с использованием гипотезы плоских сечений. При расчете железобетонных элементов по второму случаю разрушения напряжение в растянутой (менее сжатой) арматуре определяется по линейной зависимости от высоты сжатой зоны. В связи со сложностью получения такой зависимости для фиброжелезобетонных элементов напряжение в растянутой (менее сжатой) арматуре определяется в зависимости от величины диагонального эксцентриситета (e_r) и коэффициента армирования продольной арматуры (μ).

В **заключении** представлены итоги выполненного исследования и намечены перспективы дальнейших исследований.

II. ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ ДИССЕРТАЦИИ, ВЫНОСИМЫЕ НА ЗАЩИТУ

1. Получены зависимости для определения предельной растяжимости фибробетона и коэффициента k_{fbt} , учитывающего работу растянутого фибробетона на нисходящей ветви, от объемного процента фибрового армирования в диапазонах, применяемых на практике

Для определения прочности бетона и фибробетона на сжатие было испытано по 18 бетонных и фибробетонных кубов размерами 100×100×100 мм и по 12 бетонных и фибробетонных призм размерами 100×100×400 мм. В качестве фибрового армирования была принята стальная проволочная высокоуглеродистая фибра ФСВ-А-0,3/30 с анкерами на концах производства белорусского металлургического завода. Объемный процент фибрового армирования был принят $\mu=2,0\%$. Выбор фибры обусловлен ее доступностью на рынке и отношением длины фибры к ее диаметру $l_f/d_f=100$.

Для измерения продольных деформаций бетона и фибробетона использовались электромеханические тензометры “Аистова” с базой 100 мм. Модуль упругости определялся при нагрузке равной 30% от разрушающей.

В результате испытаний образцов на сжатие было получено следующее:

- добавление фибр меняет характер разрушения бетонных образцов, делая его пластичным;
- прирост кубиковой и призмной прочности фибробетона при $\mu_{fv}=2\%$ был незначителен и составил не более 20%;
- предельная сжимаемость фибробетона при $\mu_{fv}=2\%$ в сравнении с бетоном возросла до 40% и составила $\epsilon_{fbi}=(2,72\div 3,22)\times 10^{-3}$;
- увеличение модуля упругости фибробетона по сравнению с бетоном до 15%;
- коэффициент вариации составил $V \approx 0,162$.

Для определения прочности на растяжение было испытано 6 бетонных призм, по 6 фибробетонных призм с коэффициентом армирования $\mu_{fv}=1,0\%$ и $\mu_{fv}=1,5\%$, 12 фибробетонных призм с $\mu_{fv}=2,0\%$ размерами 55×55×400 мм. Выбор размеров призм обусловлен техническими характеристиками испытательной машины. Во избежание разрушения на приопорных участках призм эти участки усиливались лентами фиброармированного пластика (ФАП), наклеенными на эпоксидном клее.

Испытание проводилось на гидравлическом прессе INSTRON 600, на котором установлен динамометрический датчик и подключен компьютер с программным обеспечением BlueHill 3, позволяющим получить график зависимости перемещения от нагрузки с учетом возможности реализации нисходящей ветви.

Результаты испытаний образцов на растяжение после статистической обработки представлены в таблице 1. Коэффициент вариации составил $V \approx 0,184$.

Таблица 1 – Результаты испытаний призм на растяжение

№	Площадь поперечного сечения, А мм ²	Процент фибрового армирования (μ_f , %V)	Максимальная нагрузка, (Н)	Характеристики материала	
				Временное сопротивление растяжению, (МПа)	Относительная деформация $\varepsilon_{fbtu} \times 10^5$
1	2970	0	3970	1,09	13,4
2	3025	1,0	6370	1,57	40,7
3	3025	1,5	7910	2,13	60,8
4	3192	2,0	14500	3,70	112,4

Временное сопротивление растяжению указано с учетом масштабного коэффициента $\beta=0,815$

Проведенные испытания образцов на растяжение позволили получить следующие результаты:

- разрушение бетонных призм происходило сразу после достижения максимальной нагрузки, тогда как в фибробетонных призмах процесс деформирования продолжался вплоть до выдергивания фибр из образовавшейся трещины;
- увеличение прочности фибробетона наблюдается при $\mu_{fv} = 1,0$ %;
- при $\mu_{fv} = (1,0 \div 2,0)$ % наблюдается увеличение прочности фибробетона на растяжении в сравнении с бетоном от 40% до 75%;
- при заданном объемном проценте фибрового армирования наблюдается увеличение предельной растяжимости фибробетона в сравнении с бетоном в 3÷8 раз;
- предельная растяжимость фибробетона при $\mu_{fv} = (1,0 \div 2,0)$ % составила $\varepsilon_{fbtu} = (4,1 \div 11,2) \times 10^{-4}$.

За предельную растяжимость приняты относительные деформации, соответствующие пиковой точке диаграммы « $\sigma - \varepsilon$ ».

На основе анализа проведенных экспериментальных исследований после статистической обработки данных была предложена зависимость предельной растяжимости фибробетона от процента фибрового армирования

$$\varepsilon_{fbtu} = \varepsilon_{btu} + \mu_f \frac{R_{fbt}}{R_{bt}} \times 1,59 \times 10^{-4}, \quad (1)$$

где ε_{btu} – максимальные относительные деформации для бетона, при непродолжительном действии нагрузки принимаются 0,00015; μ_f – объемный процент фибрового армирования, на этом этапе был принят от 1% до 2%; R_{fbt} и R_{bt} – расчетное сопротивление фибробетона и бетона на осевое растяжение соответственно.

Параметрическая идентификация модели (1) выполнена методом наименьших квадратов путём линеаризации модели. Вычисленное значение скорректированного коэффициента детерминации составило 0,93.

На основании анализа экспериментальных данных автора и других исследователей (рис. 1) была предложена зависимость для коэффициента k_{fbt} , показывающего величину снижения напряжения фибробетонного сечения в растянутой зоне на нисходящей ветви

$$k_{fbt} = -0.1 \times \mu_f^2 + 0.532 \times \mu_f, \quad (2)$$

где μ_f – объемный процент фибрового армирования, %.

В качестве фибры рассматривалась металлическая фибра:

- ФСВ-А-0,3/30 ($d_f = 0,3$ мм; $l_f = 30$ мм; $l_f/d_f = 100$; $R_{sn} = 800 \div 1000$ МПа);
- «Dramix» компании «Becaert» ($d_f = 0,75$ мм и $d_f = 0,9$ мм; $l_f = 60$ мм и $l_f = 50$ мм; $l_f/d_f = 80$ и $l_f/d_f = 56$; $R_{sn} = 1260$ МПа);
- «Челябинка» производства ООО «Научно-производственная компания «Волвек плюс» ($d_f = 0,9$ мм; $l_f = 33$ мм; $l_f/d_f = 37$; $R_{sn} = 510 \div 850$ МПа);
- «Tanis» ($d_f = 0,2$ мм; $l_f = 20$ мм; $l_f/d_f = 100$; $R_{sn} = 2200$ МПа);
- профилированные отрезки стальной проволоки ($d_f = 0,32$ мм и $d_f = 0,2$ мм; $l_f = 34$ мм и $l_f = 25$ мм; $l_f/d_f = 106$ и $l_f/d_f = 125$);
- фибра «Волан-Ф» с рифленой поверхностью ($d_f = 0,6$ мм; $l_f = 36$ мм; $l_f/d_f = 60$; $R_{sn} = 280$ МПа).

Исходя из анализа графика на рисунке 1, можно отметить, что при $\mu_f > 2.8\%$ следует ожидать понижение эффективности фибрового армирования в растянутой зоне.

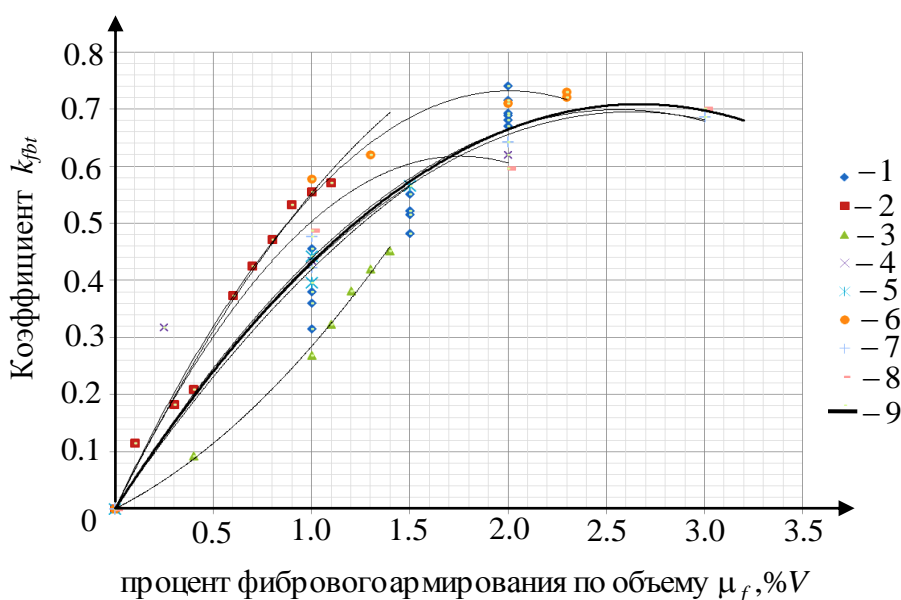


Рисунок 1 – Зависимость « $k_{fbt} - \mu_f$ »: 1 – результаты эксперимента автора; 2 – Голубев В.Ю. (фибра «Dramix»); 3 – Голубев В.Ю. (фибра «Челябинка»); 4 – Опбул Э.К.; 5 – Подшивалов С.Ф.; 6 – Степанова Г.Г.; 7 – Хегай А.О.; 8 – Хегай М.О; 9 – кривая аппроксимации

2. Экспериментально доказана эффективность использования металлической фибры в железобетонных элементах, работающих в условиях косоугольного внецентренного сжатия. Получены новые опытные данные о напряженно-деформированном состоянии и процессе трещинообразования и разрушения таких элементов

С целью исследования процессов трещинообразования, деформирования и разрушения фиброжелезобетонных элементов, работающих в условиях косоугольного сжатия, и получения данных для разработки метода расчета прочности таких элементов, в том числе для случая малых эксцентриситетов, были изготовлены и испытаны 2 серии железобетонных и фиброжелезобетонных стоек по 4 стойки в каждой серии (см. табл. 2).

Таблица 2 – Характеристики опытных образцов

Серия	Шифр	Объемный процент фибрового армирования (μ_f , %V)	Эксцентриситеты приложения нагрузки (см)	
			e_x	e_y
1	1ЖБ-3-6	0	3	6
	2ЖБ-3-6	0	3	6
	1ФБЖБ-3-6	2	3	6
	2ФБЖБ-3-6	2	3	6
2	3ЖБ-4-5	0	4	5
	4ЖБ-4-5	0	4	5
	3ФБЖБ-4-5	2	4	5
	4ФБЖБ-4-5	2	4	5

Примечание: 1-ая цифра обозначает порядковый номер, 2-ая и 3-я цифры обозначают эксцентриситеты приложения нагрузки по осям X и Y соответственно (рис. 4).

Опытные образцы представляли собой стойки прямоугольного сечения 200×200 мм и высотой 1000 мм, изготовленные из мелкозернистого бетона естественного твердения класса по прочности на сжатие В25 и В30. В качестве продольной рабочей арматуры использовались четыре стержня диаметром 10 мм класса А400. Поперечное армирование выполнялось хомутами из проволоки диаметром 5 мм класса В500 с шагом 150 мм. По торцам каркасы усиливались четырьмя сетками из проволоки диаметром 5 мм В500 с шагом ячеек 55×55 мм. Дополнительно в торцах стоек устанавливались металлические распределительные пластины толщиной 10 мм. Армирование и геометрические параметры опытных образцов представлены на рисунке 2.

Предел текучести арматуры, полученный при определении физико-механических характеристик стали, составил 500 МПа.

Испытание опытных образцов на косоугольное внецентренное сжатие производилось на прессе марки ПММ-250. Схема экспериментальной установки представлена на рисунке 3.

Во время испытания фиксировались:

- деформации бетона сжатых и растянутых граней стоек;

- ширина раскрытия трещин на всем этапе загрузки;
- картина трещинообразования;
- величины нагрузок, соответствующие моментам трещинообразования и разрушения конструкций.

Для измерения продольных деформаций бетона использовались проводниковые тензорезисторы PL-60-11 (производство Токуо Sokki Kenkyuio) с базой 60 мм и тензометры Аистова с базой 100 мм. Измерение ширины раскрытия трещин производилось с помощью лабораторного микроскопа марки МПБ-2 с ценой деления 0,05 мм.

Опытные образцы испытывались в вертикальном положении, закрепление по обоим концам – шарнирное. Шарнир создавался металлическим шариком диаметром 40 мм, зажатым между стальными пластинами толщиной 50 и 30 мм. Передача нагрузки на образцы происходила с помощью специальных металлических оголовков, расположенных на торцах стоек.

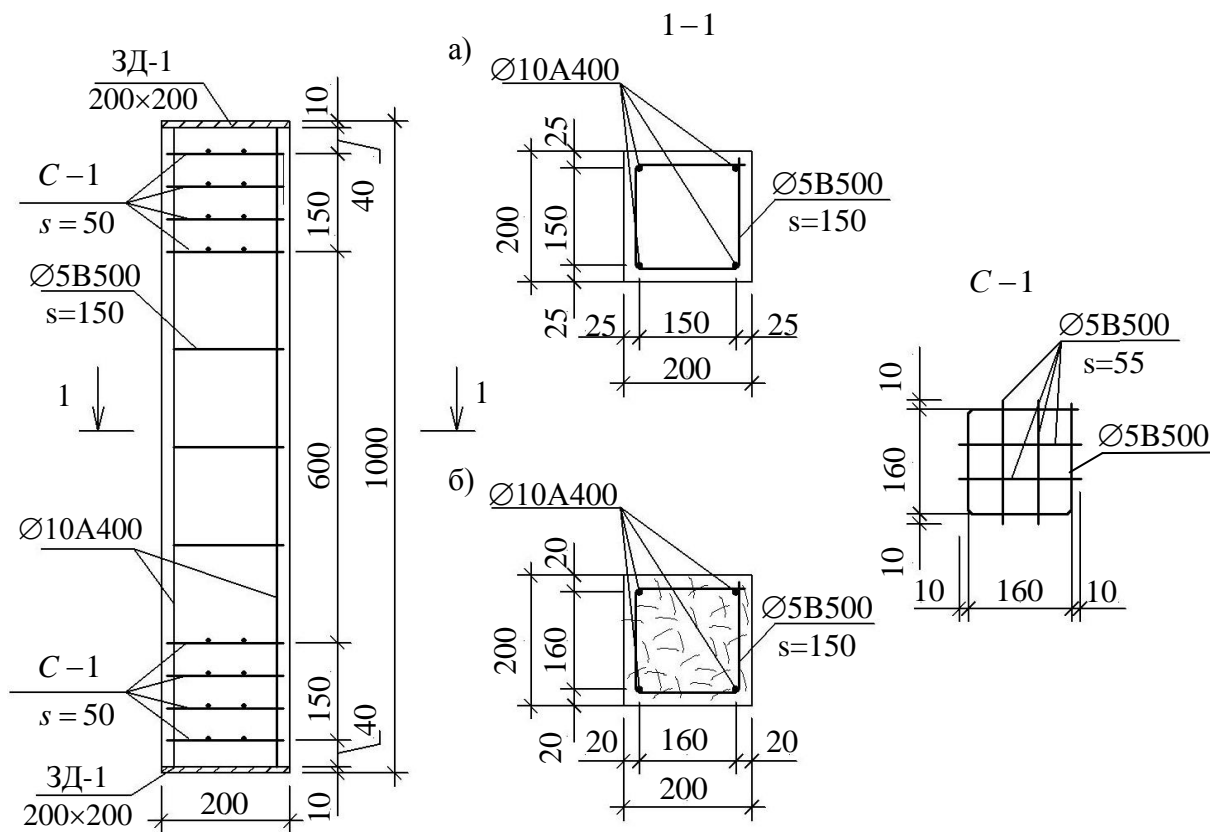


Рисунок 2 – Схема армирования опытных образцов

а) сечение железобетонного образца б) сечение фибробетонного образца

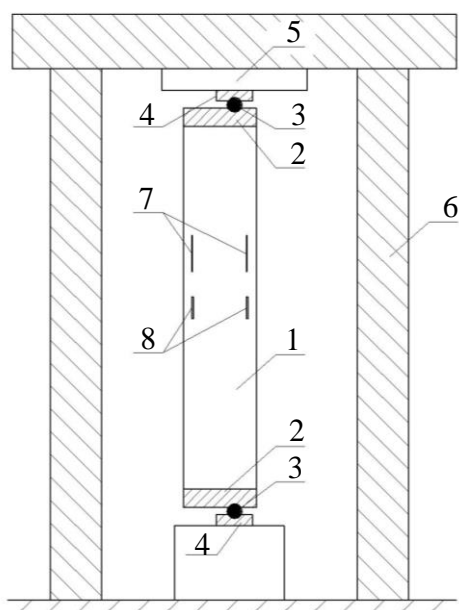


Рисунок 3 – Схема испытательной установки и измерительные приборы:

1) – опытный образец; 2) – стальная пластина $t=50$ мм; 3) – шарнирное закрепление $d=40$ мм; 4) – стальная пластина $t=30$ мм; 5) – стальная пластина пресса; 6) – рама; 7) – тензометры Аистова; 8) – тензодатчики

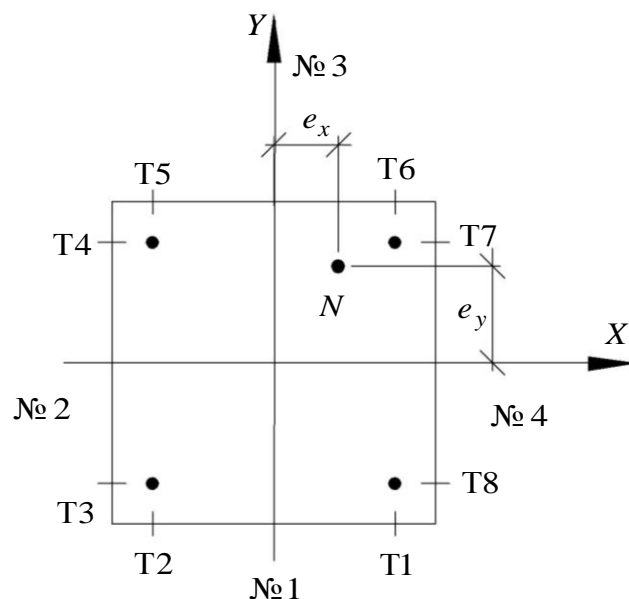


Рисунок 4 – Схема приложения нагрузки и расположения тензорезисторов на гранях стоек (№1÷№4):
T1÷T8 – тензорезисторы

Результаты испытаний опытных образцов приведены в таблице 3.

Таблица 3 – Результаты испытаний стоек на косое сжатие

Шифр	Разрушающая нагрузка, N_p (т)	* Максимальные деформации на сжатие $\varepsilon_b(\varepsilon_{fb}) \times 10^3$	* Максимальные деформации на растяжение $\varepsilon_{bt}(\varepsilon_{fbt}) \times 10^3$
1ЖБ-3-6	53,9	3,08	1,22
2ЖБ-3-6	50,8	3,02	1,31
1ФБЖБ-3-6	60,0	4,20	1,93
2ФБЖБ-3-6	58,3	4,42	1,89
3ЖБ-4-5	57,4	2,95	1,27
4ЖБ-4-5	58,0	2,90	1,12
3ФБЖБ-4-5	70,7	4,15	1,82
4ФБЖБ-4-5	74,0	4,23	1,87

* Максимальные деформации представлены по наиболее сжатым и растянутым граням при нагрузке $0,95 \times N_p$

Согласно замерам перемещений сжатая зона бетона и фибробетона в начальной стадии загрузения имела форму пятиугольника. При дальнейшем увеличении нагрузки площадь растянутой зоны увеличивалась. В стадии близкой к разрушению сжатая зона имела форму четырехугольника (рис. 5).

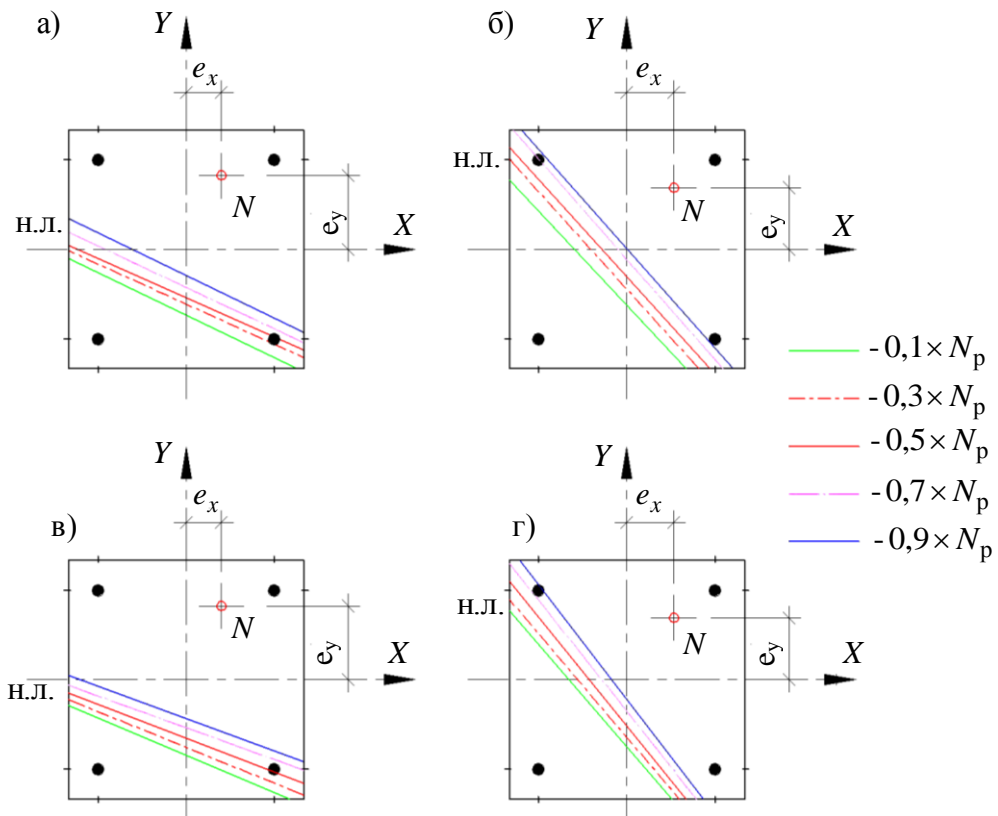


Рисунок 5 – Схема положения нейтральной линии в зависимости от эксцентриситетов прикладываемой нагрузки: а) стойки ФБЖБ-3-6; б) стойки ФБЖБ-4-5; в) стойки ЖБ-3-6; г) стойки ЖБ-4-5

Общий вид образцов после испытания представлен на рисунке 6.

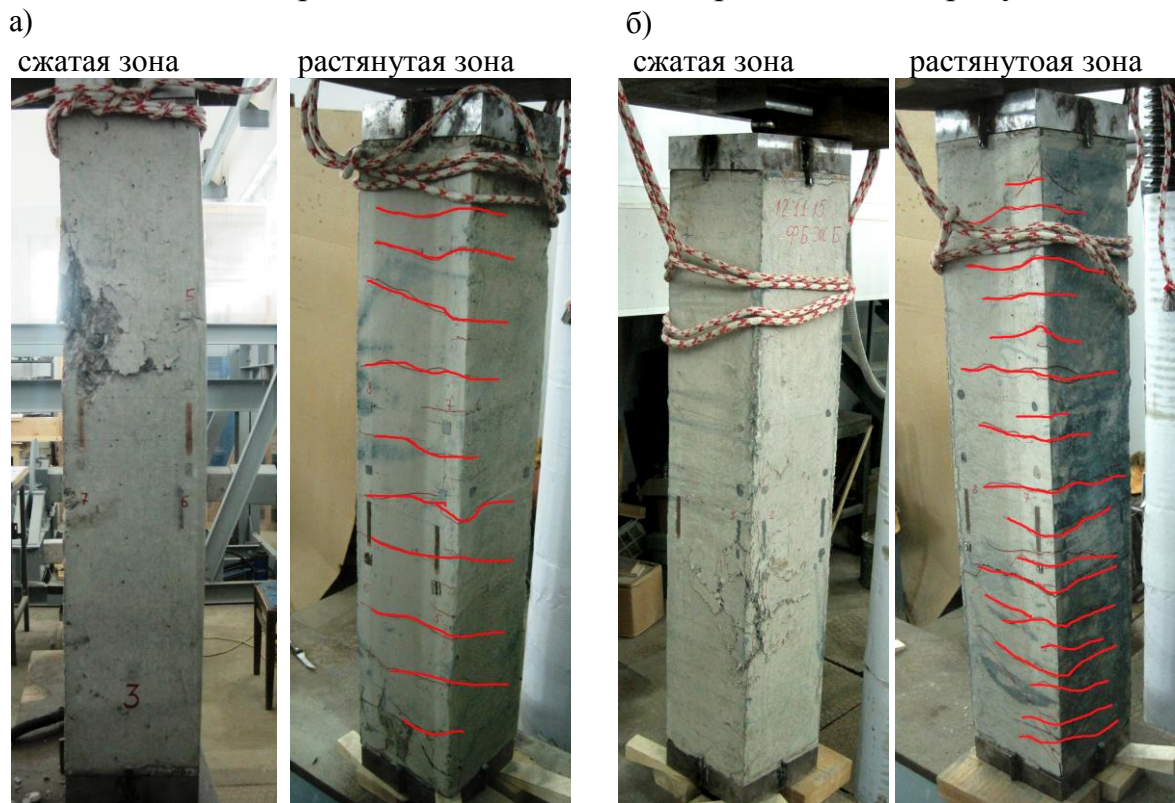


Рисунок 6 – Вид разрушенных стоек после испытания
а) стойка ЖБ-4-5; б) стойка ФБЖБ-4-5

В результате обработки опытных данных, полученных из испытаний стоек на косоое внецентренное сжатие, обнаружено следующее:

- разрушение железобетонных и фиброжелезобетонных стоек произошло, как и было запланировано, по второму случаю от раздробления бетона (фибробетона) сжатой зоны. Однако в отличие от хрупкого характера разрушения железобетонных образцов разрушение фиброжелезобетонных стоек носило вязкий характер;
- введение фибрового армирования положительно сказывается на несущей способности, в отдельных случаях ее увеличение достигало 19%;
- предельные деформации на сжатых гранях фиброжелезобетонных стоек в зависимости от приложения нагрузки увеличились до 32% по сравнению с предельными деформациями на сжатых гранях железобетонных стоек;
- предельные деформации на растянутых гранях фиброжелезобетонных стоек в зависимости от приложения нагрузки увеличились до 40% по сравнению с предельными деформациями на растянутых гранях железобетонных стоек;
- усилие трещинообразования в фиброжелезобетонных образцах было в 2 раза больше, чем в железобетонных;
- в фиброжелезобетонных образцах наблюдалось уменьшение шага трещин по сравнению с железобетонными аналогами в $2\div 3$ раза;
- ширина раскрытия трещин при нагрузках $0,6\div 0,7$ от разрушающей в железобетонных образцах составила 0,2 мм, а в фиброжелезобетонных – 0,1 мм.

3. Получена зависимость напряжения в растянутой (менее сжатой) арматуре от эксцентриситетов приложения силы и от коэффициента армирования продольной арматуры на основании результатов численного эксперимента

С целью сравнения с экспериментальными данными был реализован численный эксперимент в программном комплексе ЛИРА-САПР 2013 фиброжелезобетонных стоек, работающих в условиях косоого внецентренного сжатия, в классической линейной и нелинейной постановке с учетом полученной в работе диаграммы деформирования фибробетона.

Задачи численного эксперимента:

- анализ НДС фиброжелезобетонных стоек, работающих в условиях косоого внецентренного сжатия.
- графическое представление изополей главных сжимающих и растягивающих напряжений.
- графическое представление изополей перемещений.
- сопоставление результатов численного и физического экспериментов.

В программном комплексе были замоделированы фиброжелезобетонные стойки сечением 200×200 мм, аналогичные экспериментальным образцам. За расчетную схему была принята половина стойки длиной 500 мм для сокращения количества конечных элементов (КЭ) при выполнении расчета. Нижнее сечение стойки закреплялось от вертикальных перемещений по оси Z.

Для моделирования фибробетона в нелинейной постановке использовался КЭ тип 231 – физически нелинейный параллелепипед размерами 0,01x0,01x0,01 (м), для арматуры – КЭ тип 210. Объемные КЭ были равномерно распределены по всему заданному сечению исследуемого объекта с шагом 0,01 м. Нагрузка прикладывалась сверху с теми же эксцентриситетами, что и в физическом эксперименте.

Для фибробетона на основании полученных опытных данных была принята трехлинейная диаграмма деформирования (рис. 7). Для арматуры использовалась диаграмма Прандтля, принятая в соответствии с СП 63.13330-2012.

На рисунке 7 приняты следующие обозначения:

$\sigma_{fb1} = 0.7R_{fb}$ – напряжение фибробетона сжатой зоны в точке излома диаграммы; $\varepsilon_{fb1} = \frac{\sigma_{fb1}}{E_{fb}}$;

ε_{fb0} – относительные деформации при осевом сжатии фибробетона;

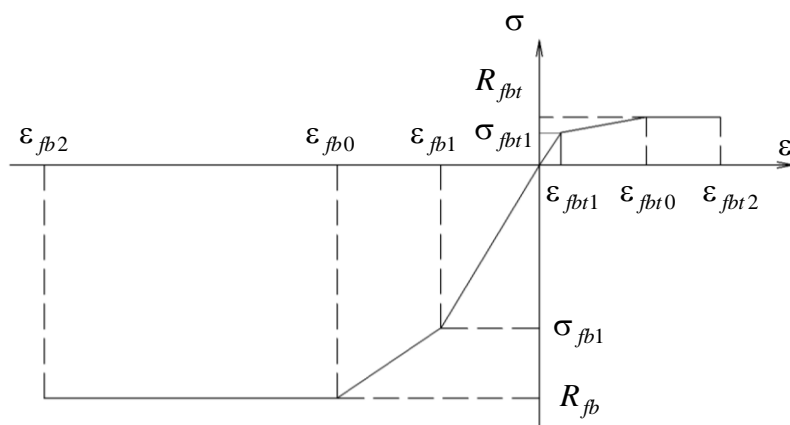


Рисунок 7 – Принятая диаграмма деформирования фибробетона

ε_{fb2} – максимальные относительные деформации фибробетона при сжатии;

$\sigma_{fb1} = 0.7R_{fb}$ – напряжение фибробетона растянутой зоны в точке излома диаграммы; $\varepsilon_{fb1} = \frac{\sigma_{fb1}}{E_{fb}}$; ε_{fb0} – относительные деформации при осевом растяжении фибробетона; ε_{fb2} – максимальные относительные деформации при растяжении.

Согласно изополям напряжений (рис. 8), полученным в результате численного эксперимента, при разрушающей экспериментальной нагрузке сжатая зона фибробетона «выключается» на 20÷25% от площади сжатой зоны. Под «выключением из работы» принималось достижение объемным элементом предела прочности фибробетона на сжатие.

Для моделирования фибробетона в линейной постановке использовался КЭ тип 36 – восьми узловой шестигранник размерами 0,01x0,01x0,01 (м), для арматуры – КЭ тип-10.

Расхождение между данными физического и численного эксперимента в нелинейной постановке удовлетворительное, среднее отклонение между относительными деформациями на сжатых гранях составило 10,5%, на растянутых – 12,9%; максимальное отклонение на сжатых гранях составило 15,9%, на растянутых – 17,0%. Среднее квадратичное отклонение составило 3,3%.

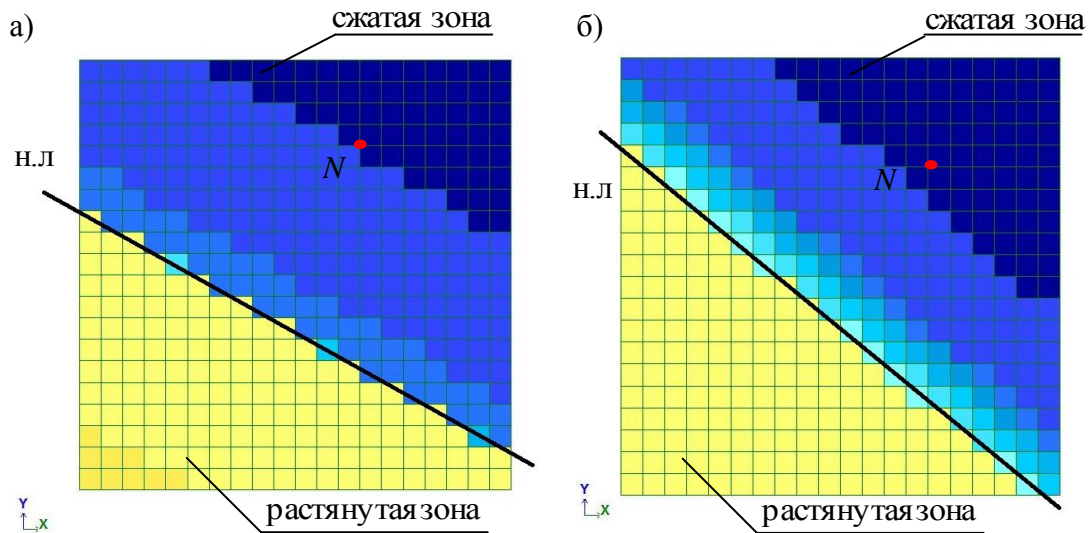


Рисунок 8 – Изополя напряжений ФБЖБ стоек при разрушающей нагрузке
а) ФБЖБ-3-6; б) ФБЖБ-4-5

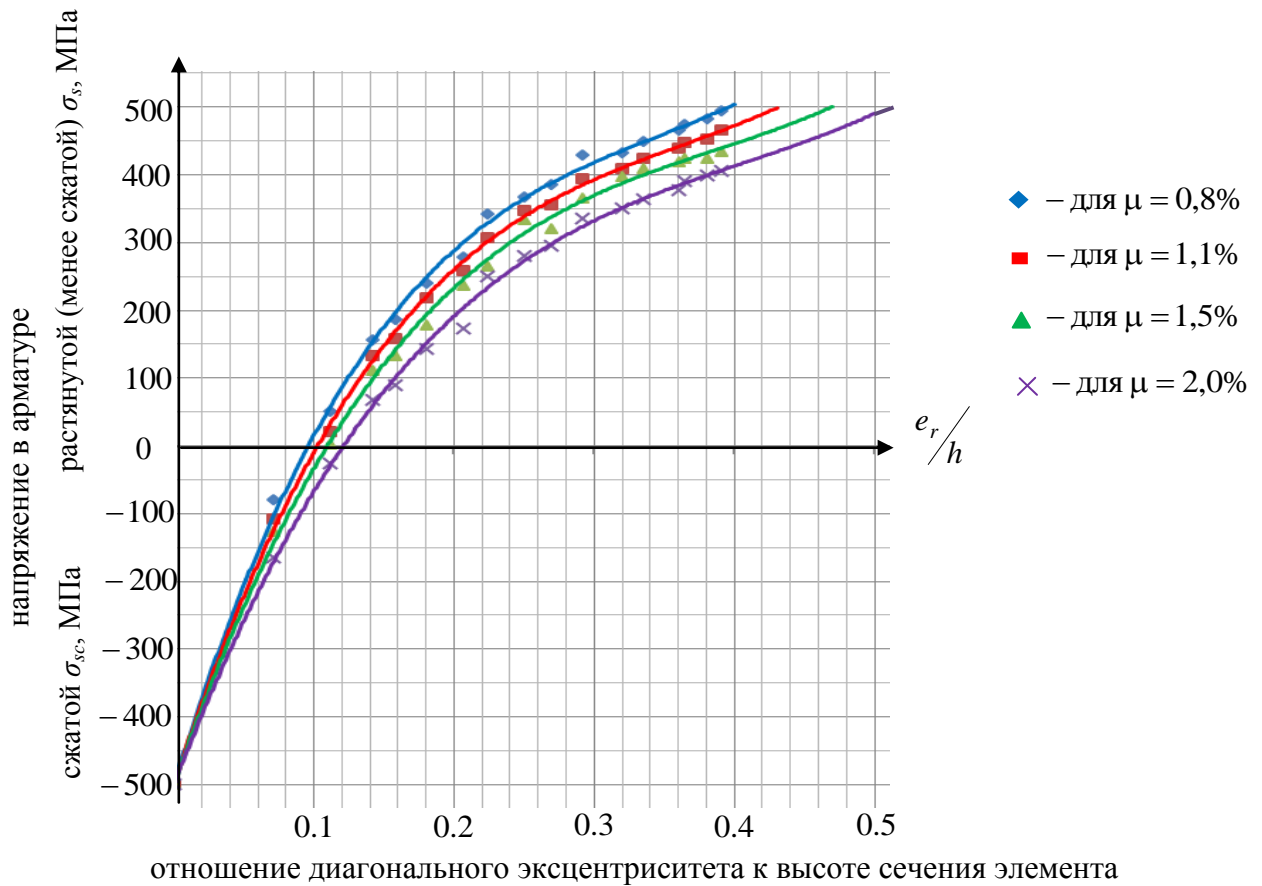
Расхождение между данными физического и численного эксперимента в линейной постановке при нагрузке до $0,3 \times N_p$ включительно удовлетворительное. С увеличением нагрузки расхождение между данными становится значительным, результаты физического эксперимента в разы превышают результаты численного эксперимента.

Согласие результатов численного эксперимента в нелинейной постановке с физическим позволило провести дальнейшие исследования кососжимаемых элементов в данном программном комплексе и получить для случая малых эксцентриситетов зависимость напряжения в наиболее растянутом (менее сжатом) стержне от величины эксцентриситетов приложения нагрузки и от коэффициента армирования продольной арматуры.

На рисунке 9 представлен график зависимости напряжения в растянутой (менее сжатой) арматуре от величины отношения диагонального эксцентриситета $e_r = \sqrt{e_x^2 + e_y^2}$ к высоте сечения элемента h при коэффициенте армирования продольной арматуры $\mu = 0,8\%$; $1,1\%$; $1,5\%$ и $2,0\%$.

Разрушение кососжимаемых фиброжелезобетонных элементов происходит по двум схемам: по растянутой зоне (первый случай) и по сжатой зоне (второй случай).

На основании проведенного анализа полагаем, что первый случай косого сжатия (когда величина напряжения в арматуре достигает предела текучести, т.е. $\sigma_s = \sigma_y = 500 \text{ МПа}$) наблюдается для $\mu = 0,8\%$ при $e_r/h \geq 0,4$; для $\mu = 1,1\%$ при $e_r/h \geq 0,43$; для $\mu = 1,5\%$ при $e_r/h \geq 0,47$; для $\mu = 2,0\%$ при $e_r/h \geq 0,51$. По второму случаю разрушения возможны трапециевидная и пятиугольная формы сжатой зоны фибробетона (рис. 10).

Рисунок 9 – График зависимости « $\sigma_s - e_r/h$ »

Трапецевидная форма наблюдается для $\mu=0,8\%$ при $0,3 \leq e_r/h < 0,4$; для $\mu=1,1\%$ при $0,32 \leq e_r/h < 0,43$; для $\mu=1,5\%$ при $0,33 \leq e_r/h < 0,47$; для $\mu=2,0\%$ при $0,34 \leq e_r/h < 0,51$.

Пятиугольная форма сжатой зоны фибробетона наблюдается для $\mu=0,8\%$ при $0 < e_r/h < 0,3$; для $\mu=1,1\%$ при $0 < e_r/h < 0,32$; для $\mu=1,5\%$ при $0 < e_r/h < 0,33$; для $\mu=2,0\%$ при $0 < e_r/h < 0,34$.

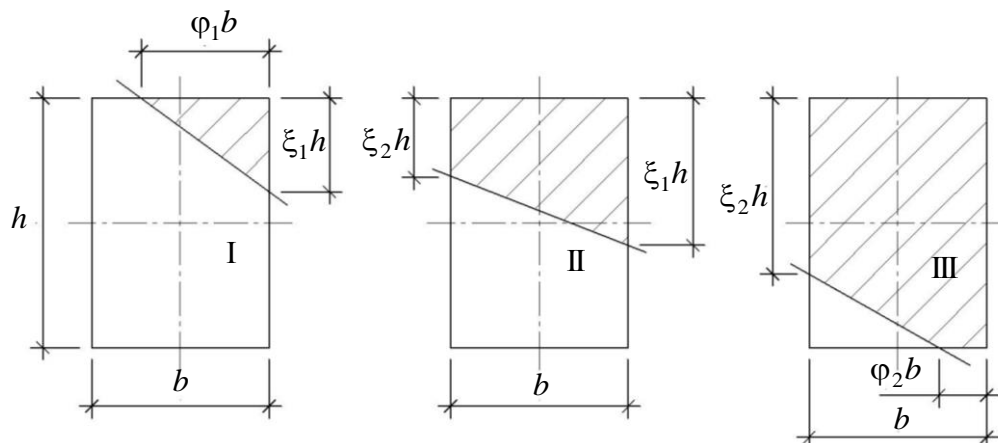


Рисунок 10 – Случаи положения нейтральной линии

На основании анализа данных численного эксперимента предложена следующая структура регрессионного уравнения (3) зависимости $\sigma_s - e_r/h$ от процента армирования продольной арматуры. Скорректированный коэффициент детерминации составляет 0,993.

$$\sigma_s = 809,57 + 344,12 \times \ln\left(\frac{e_r}{h}\right) - 93,54 \times \ln(\mu), \quad [\text{МПа}] \quad (3)$$

где μ – коэффициент армирования продольной арматуры (в %).

Данная зависимость применима при $e_r/h > 0,02$.

4. Разработаны метод расчета по первой группе предельных состояний коротких кососжимаемых фиброжелезобетонных элементов с использованием реальных диаграмм деформирования материалов в сжатой и растянутой зонах, реализуемый с помощью нелинейного расчета, и метод расчета, основанный на упрощенном представлении характера деформирования материалов выполненный инженерным методом

Расчет по нелинейной деформационной модели (НДМ) с использованием аналитических зависимостей « σ – ε » бетона и арматуры, полученных на основе опытных диаграмм, позволяет предусматривать сечения элементов любой формы, в том числе несимметричной. В отличие от метода предельных усилий, метод расчета по НДМ позволяет выполнять анализ НДС не только в предельном состоянии, но и на предыдущих стадиях нагружения.

Расчет прочности кососжимаемых фиброжелезобетонных элементов производится на основе деформационных критериев:

$$\varepsilon_{fb,\max} \leq \varepsilon_{fb2}; \quad \varepsilon_{s,\max} \leq \varepsilon_{s,ult},$$

где $\varepsilon_{fb,\max}$ и $\varepsilon_{s,\max}$ – относительные деформации наиболее сжатого волокна фибробетона и наиболее растянутого стержня арматуры в нормальном сечении элемента соответственно; ε_{fb2} – предельно допустимое значение относительной деформации фибробетона при сжатии; $\varepsilon_{s,ult}$ – предельно допустимое значение относительной деформации удлинения арматуры, принимаемое в соответствии с СП 63.13330-2012 равным 0,025 для арматуры с физическим пределом текучести и 0,015 для арматуры с условным пределом текучести.

При расчете по НДМ приняты следующие допущения.

1. Нормальное сечение элемента разбивается на участки с конечными размерами, размеры и форма которых принимается, исходя из удобств и требований точности расчета. В пределах площади каждого такого участка фибробетона A_{fbi} с координатами x_i и y_i и арматурных стержней A_{sj} с координатами x_j и y_j нормальные напряжения считаются равномерно распределенными с интенсивностью σ_{fbi} и σ_{sj} .

2. Знаки координат центров тяжести участков с конечными размерами фибробетона и арматурных стержней принимают в соответствии с назначенной системой координат XOY .

3. Справедлив закон плоских сечений.

4. Эпюра напряжений в сжатой зоне принимается двухлинейной (рис. 11).

5. Относительные деформации сжатой зоны ε_{fb1} и ε_{fb2} принимаем

$$\varepsilon_{fb1} = 1,8 \times 10^{-3} \times \left(\frac{R_{fb}}{R_b} \right)^2; \quad \varepsilon_{fb2} = 3,5 \times 10^{-3} + 5 \times \left(\frac{R_{fb}}{R_b} - 1 \right) \times 10^{-3}.$$

6. Эпюра напряжений в растянутой зоне принимается трехлинейной (рис.12).

7. Относительные деформации растянутой зоны $\varepsilon_{fbt0} = \varepsilon_{fbtu}$ принимаем согласно формуле (1), ε_{fbt2} ограничиваем предельной растяжимостью арматуры

$$\varepsilon_{fbt0} = 1,5 \times 10^{-4} + \mu_f \times \frac{R_{fbt}}{R_{bt}} \times 1,59 \times 10^{-4}; \quad \varepsilon_{fbt2} = \frac{R_s}{E_s}.$$

8. Величину растягивающих напряжений в краевых волокнах растянутой зоны сечения в сторону запаса принимаем равной нулю ($\sigma_{fbt} = 0$).

9. Процесс сходимости следует считать завершенным, если полученное на предыдущем и текущем этапе расхождение в результатах кривизны и деформаций отличается не более заранее заданной величины. В нашем случае, согласно предложениям Байкова В.Н., таким критерием окончательной сходимости принимается различие в относительном среднеквадратическом отклонении деформаций на двух смежных итерациях не более 0,1%

$$\sqrt{\frac{1}{3} \times \left(\left(\frac{\varepsilon_{0,i} - \varepsilon_{0,i+1}}{\varepsilon_{0,i+1}} \right)^2 + \left(\frac{1/r_{x,i} - 1/r_{x,i+1}}{1/r_{x,i+1}} \right)^2 + \left(\frac{1/r_{y,i} - 1/r_{y,i+1}}{1/r_{y,i+1}} \right)^2 \right)} \leq \Delta,$$

где $\Delta = 0,001$.

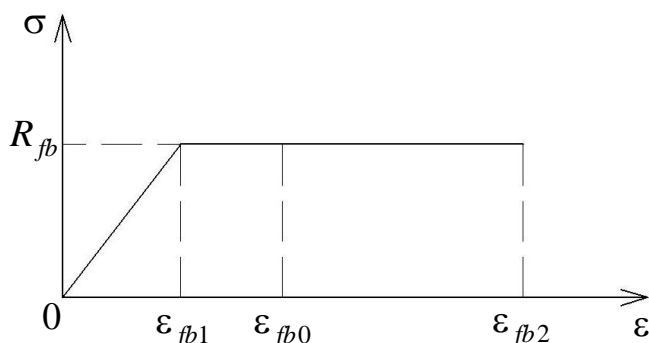


Рисунок 11 – Зависимость « $\sigma - \varepsilon$ » для фибробетона при осевом сжатии

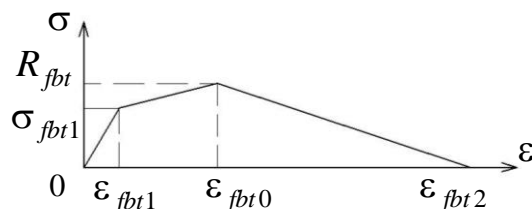


Рисунок 12 Диаграмма « $\sigma - \varepsilon$ » для фибробетона при осевом растяжении

На рисунке 12 приняты следующие обозначения:

$\varepsilon_{fb1} = m \times \varepsilon_{fb0}$ – относительные деформации, соответствующие образованию первой трещины, где $m = (0.2 \div 0.3)$; $\sigma_{fb1} = n \times R_{fb}$ – напряжение в фибробетоне, возникающее при образовании первой трещины, где $n = (0.6 \div 0.8)$.

Схема расчетного сечения кососжимаемого фиброжелезобетонного элемента представлена на рисунке 13.

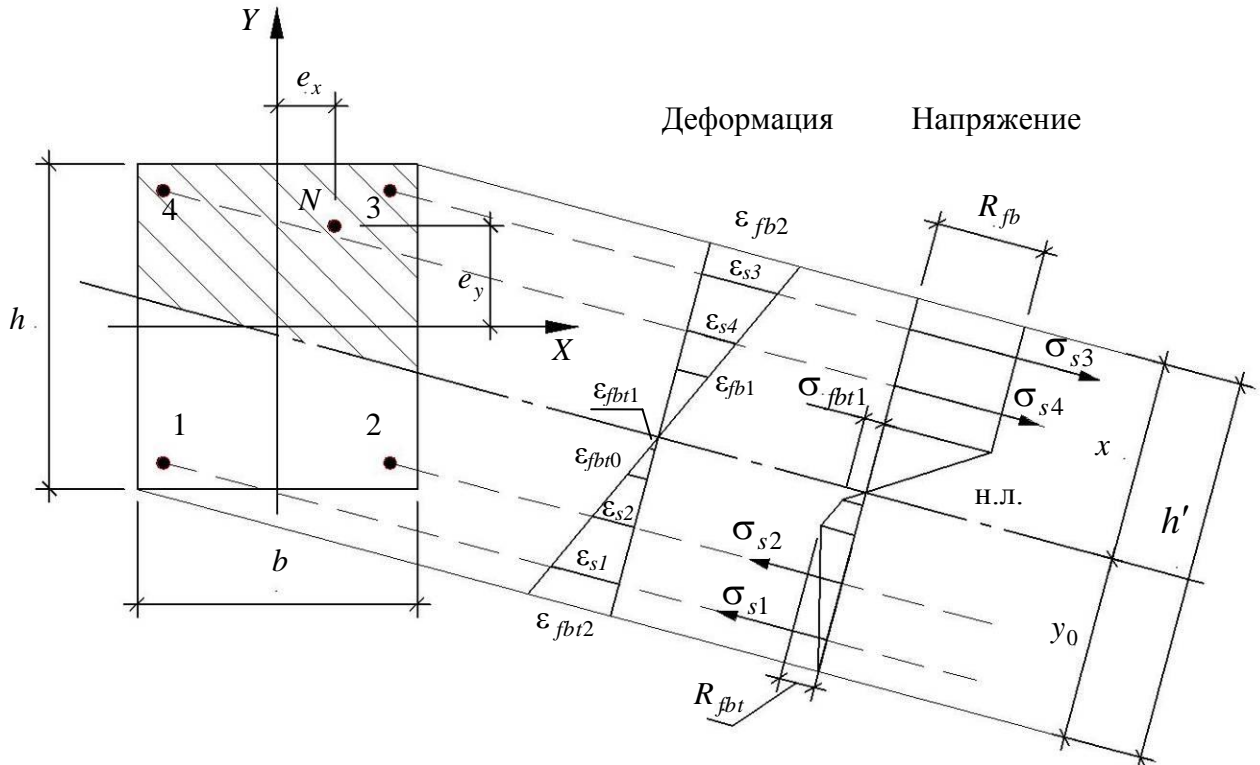


Рисунок 13 – Схема расчетного сечения фиброжелезобетонного кососжимаемого элемента

Условия равновесия внешних и внутренних сил относительно выбираемых координатных осей записываются для любого уровня загрузки в единообразной форме:

$$N = \sum_i \sigma_{fbi} A_{fbi} + \sum_j \sigma_{sj} A_{sj}, \quad (4)$$

$$M_x = \sum_i \sigma_{fbi} A_{fbi} x_i + \sum_j \sigma_{sj} A_{sj} x_j, \quad (5)$$

$$M_y = \sum_i \sigma_{fbi} A_{fbi} y_i + \sum_j \sigma_{sj} A_{sj} y_j, \quad (6)$$

где $M_x = N \times e_x$; $M_y = N \times e_y$.

Система уравнений (4) – (6) решается итерационным способом в соответствии с СП 63.13330-2012.

В таблице 4 представлено сравнение результатов теоретического расчета по НДМ с экспериментальными данными. Относительные деформации наиболее сжатой и растянутой грани элемента даны при нагрузке, равной $0,95 \times N_p$.

Таблица 4 – Сравнение результатов теоретического расчета по НДМ с результатами физического эксперимента

Шифр	Параметры	Эксперимент	НДМ	Δ %
1ФБЖБ-3-6	$N_{p, T}$	60,0	57,1	-5,1
	$\varepsilon_{fbr} \times 10^3$	1,93	2,13	9,4
	$\varepsilon_{fb} \times 10^3$	4,20	3,76	-11,7
2ФБЖБ-3-6	$N_{p, T}$	58,3	55,7	-4,7
	$\varepsilon_{fbr} \times 10^3$	1,89	2,08	9,1
	$\varepsilon_{fb} \times 10^3$	4,42	3,85	-14,8
3ФБЖБ-4-5	$N_{p, T}$	70,7	63,2	-11,9
	$\varepsilon_{fbr} \times 10^3$	1,82	2,04	10,8
	$\varepsilon_{fb} \times 10^3$	4,15	3,82	-8,6
4ФБЖБ-4-5	$N_{p, T}$	74,0	67,0	-10,4
	$\varepsilon_{fbr} \times 10^3$	1,87	2,11	11,4
	$\varepsilon_{fb} \times 10^3$	4,23	3,89	-8,7

Примечания: 1) $\Delta = \frac{N_{\text{теор}} - N_{\text{эксп}}}{N_{\text{теор}}} \times 100\%$; 2) $\Delta = \frac{\varepsilon_{\text{теор}} - \varepsilon_{\text{эксп}}}{\varepsilon_{\text{теор}}} \times 100\%$

Расхождение теоретических разрушающих усилий от экспериментальных составило $4,7 \div 11,9\%$. При среднем арифметическом отклонении $8,0\%$ и среднем квадратичном отклонении $3,17\%$.

Расхождение теоретических данных относительных деформаций наиболее сжатой и растянутой грани элемента от экспериментальных составило $8,6 \div 14,8\%$. При среднем арифметическом отклонении $10,6\%$ и среднем квадратичном отклонении $1,96\%$.

Данный метод удовлетворительно описывает действительную работу конструкции. Но при этом расчет по НДМ довольно трудоемок, требует использования автоматизированных программ для реализации расчета. В повседневной практике проектирования требуются более простые решения задачи.

С этой целью предложен метод расчета кососжимаемых фиброжелезобетонных элементов с использованием статических уравнений равновесия.

Анализ результатов экспериментальных исследований позволил принять основные расчетные предпосылки.

1. Эпюра напряжений в фибробетоне сжатой зоны принимается прямоугольной с ординатой, равной расчетному сопротивлению фибробетона сжатию R_{fb} .

2. Эпюра напряжений в фибробетоне растянутой зоны принимается прямоугольной с ординатой, равной по величине $\sigma_{fbr} = k_{fbr} \times R_{fbr}$, где R_{fbr} – расчетное сопротивление фибробетона растяжению; k_{fbr} – безразмерный коэффициент, определяемый по формуле (2).

3. В элементах, разрушающихся по случаю 1, напряжение в наиболее растянутом арматурном стержне принимается равным R_s ; а разрушающихся по случаю 2 – равным σ_s , определяемому по зависимости (3).

4. В случае трапециевидной формы сжатой зоны фибробетона при определении равнодействующей в растянутой арматуре позиции 1 и 2 (рис. 15) для σ_s вводится поправочный коэффициент 0,64.

5. Напряжение в сжатой арматуре принимается равным расчетному сопротивлению на сжатие ($\sigma_{sc} = R_{sc}$).

6. Центры тяжести растянутой и сжатой продольной арматуры, сжатого и растянутого фибробетона и точка приложения силы лежат на одной прямой – силовой линии, проходящей через точку приложения силы и центр тяжести растянутой арматуры.

Рассмотрим второй случай положения нейтральной линии с трапециевидной формой сжатой зоны фибробетона, как случай наиболее сложный (рис. 14). Положение сжатой зоны характеризуется параметрами ξ_1 и ξ_2 (рис. 10).

Разрушающее усилие кососжимаемых фиброжелезобетонных элементов определяется совместным решением трех уравнений статического равновесия:

$$M_x = N \cdot e_x = A_{fb} R_{fb} z_{bx} + A'_s R_{sc} z_{sx} - A_{fbt} \sigma_{fbt} z_{btx}, \quad (7)$$

$$M_y = N \cdot e_y = A_{fb} R_{fb} z_{by} + A'_s R_{sc} z_{sy} - A_{fbt} \sigma_{fbt} z_{bty}, \quad (8)$$

$$N = A_{fb} R_{fb} + A_s R_{sc} - A'_s \sigma_s - A_{fbt} \sigma_{fbt}, \quad (9)$$

где M_x, M_y – внешние моменты в плоскости XOZ и в плоскости YOZ соответственно; N – продольная сжимающая сила; e_x, e_y – эксцентриситеты приложенной силы.

Напряжение в растянутой арматуре σ_s в (9) при первом случае разрушения $\sigma_s = R_s$, при втором – σ_s определяется по (3).

Подставляя (7) в (8), получим

$$\begin{aligned} & A_{fb} R_{fb} z_{bx} + A'_s R_{sc} z_{sx} - A_{fbt} \sigma_{fbt} z_{btx} = \\ & = (A_{fb} R_{fb} + A'_s R_{sc} - A_s \sigma_s - A_{fbt} \sigma_{fbt}) \times (e_x + x_s) \end{aligned} \quad (10)$$

Решая совместно (10) и (8), получим квадратное уравнение (11)

$$A \xi_2^2 + B \xi_2 + C = 0, \quad (11)$$

$$\text{где } A = \frac{h \times (b^2 + 12e_x^2)}{(b - 6e_x)^2 (e_y + y_s - h + a)}; \quad B = \frac{b}{0.5b - 3e_x} + \frac{h \times (0.5b + e_x)}{(e_y + y_s - h + a) \times (0.5b - 3e_x)} \times m;$$

$$C = m \times \left(1 + \frac{h}{3 \times (e_y + y_s - h + a)} \times m\right) + p; \quad m = \frac{(e_x + x_s) \times (\alpha'_s - \alpha_s - 2\alpha_{nt}) - \alpha'_{sx} + 2\alpha_{nt} \times x_s}{(\alpha_n + \alpha_{nt}) \times \left(\frac{b}{6} - e_x\right)};$$

$$p = \frac{(e_y + y_s) \times (\alpha'_s - \alpha_s - 2\alpha_{nt}) - \alpha'_{sy} + \alpha_{nt} \times (h - 2a)}{(\alpha_n + \alpha_{nt}) \times (e_y + y_s - h + a)}; \quad \alpha_n = \frac{R_{fb} \times b \times h}{2}; \quad \alpha_{nt} = \frac{\sigma_{fbt} \times b \times h}{2};$$

$$\alpha'_s = R_{sc} \times A'_s; \quad \alpha_s = \sigma_s \times A_s; \quad \alpha'_{sx} = R_{sc} \times A'_s \times (x_s + x'_s); \quad \alpha'_{sy} = R_{sc} \times A'_s \times (y_s + y'_s).$$

Геометрические параметры, входящие в (7) – (11) представлены на рисунках 14 и 15.

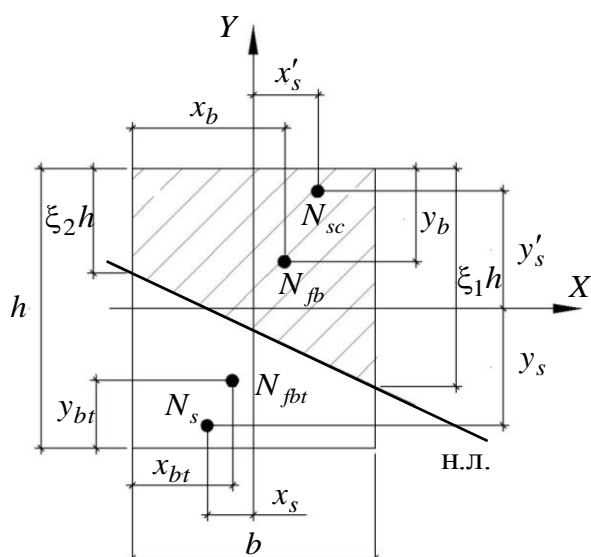


Рисунок 14 – Положение центров тяжести сжатого и растянутого фибробетона, сжатой и растянутой арматуры

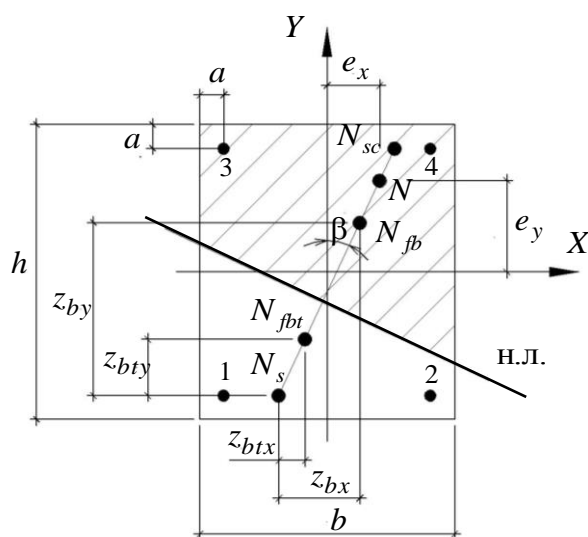


Рисунок 15 – Теоретическая модель расчетного поперечного сечения кососжимаемого фибро-железобетонного элемента

После нахождения параметров ξ_1 и ξ_2 определяем разрушающее усилие, используя выражение (9).

В таблице 5 представлены экспериментальные и теоретические значения разрушающего усилия.

Таблица 5 – Сравнение результатов теоретического расчета с результатами физического эксперимента

Шифр	$N_{опь, т}$	$N_{теор, т}$	$\Delta \%$
1ФБЖБ-3-6	60,0	54,1	-10,9
2ФБЖБ-3-6	58,3	52,6	-10,8
3ФБЖБ-4-5	70,7	62,1	-13,8
4ФБЖБ-4-5	74,0	65,5	-13,0

$$\Delta = \frac{N_{теор} - N_{эксп}}{N_{теор}} \times 100\%$$

Расхождение теоретических разрушающих усилий от экспериментальных составило $10,8 \div 13,8\%$. При среднем арифметическом отклонении $12,1\%$ и среднем квадратичном отклонении $1,3\%$.

Это означает, что и данная методика расчета с использованием уравнений равновесия дает удовлетворительное согласие с экспериментальными данными, а значит, ее можно использовать при расчете кососжимаемых фибро-железобетонных элементов, а именно колонн промышленных и гражданских зданий и сооружений, стоек мостов, эстакад, инженерных сооружений.

III. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании выполненных экспериментально-теоретических исследований в диссертации подводятся основные итоги.

1. На основании анализа полученных данных из исследований фибробетона при сжатии и растяжении были получены зависимости: для определения предельной растяжимости фибробетона ε_{fbu} ; для коэффициента k_{fbt} , учитывающего работу фибробетона при растяжении на нисходящей ветви.

2. Экспериментальные исследования фиброжелезобетонных элементов на косо внецентренное сжатие показали, что добавление стальной фибры меняет характер разрушения образцов, делая его пластичным. Несущая способность железобетонных стоек с введением фибры возрастает до 19%. Предельная сжимаемость фиброжелезобетонных стоек увеличивается до 32% по сравнению с аналогичными железобетонными образцами, а предельная растяжимость – до 40%. Трещины в фиброжелезобетонных стойках имеют меньший шаг и меньшую ширину раскрытия по сравнению с аналогичными железобетонными образцами.

3. Экспериментально подтверждено, что процесс разрушения кососжимаемых фиброжелезобетонных элементов в принципе схож с разрушением железобетонных элементов. Однако разрушение фиброжелезобетонных элементов носит более вязкий характер, чем железобетонных.

4. Результаты выполненного численного эксперимента позволили получить выражение для определения величины напряжения в наиболее растянутом (менее сжатом) арматурном стержне в зависимости от эксцентриситетов приложения силы и коэффициента армирования продольной арматуры.

5. На основании проведенных исследований разработаны методы расчета фиброжелезобетонных элементов, работающих в условиях косо внецентренного сжатия, на основе нелинейной деформационной модели и статических уравнений равновесия. Удовлетворительное согласие теоретических и экспериментальных данных позволяет использовать предложенные методы расчета в практике проектирования колонн, стоек мостов, эстакад, инженерных сооружений.

Настоящая диссертация, однако, не исчерпывает всего круга вопросов, связанных с построением теории и расчетов фиброжелезобетонных конструкций при косом внецентренном сжатии. Вместе с тем, она создает реальные предпосылки для их решений. По мнению автора, дальнейшие исследования целесообразно направить на учет гибкости, длительных процессов, динамических воздействий, а также на исследование вопросов живучести и влияния запроектных воздействий.

IV. ОСНОВНЫЕ НАУЧНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО ИССЛЕДОВАНИЯ

Публикации в периодических научных изданиях, рекомендованных ВАК РФ

1. Евдокимова, Т. С. Практический метод расчета кососжимаемых фиброжелезобетонных элементов [Текст] / Т. С. Евдокимова // «Вестник гражданских инженеров» СПбГАСУ. – СПб, 2015 – №3 (50). Стр. 68–74. (0,4375 п.л.)

2. **Евдокимова, Т. С.** Экспериментальные исследования фиброжелезобетонных элементов в условиях косоугольного внецентренного сжатия [Электронный ресурс] / Т.С. Евдокимова // «Современные проблемы науки и образования». – 2015. – № 2; URL: <http://www.science-education.ru/129-21609>. (0,38 п.л.)

3. **Евдокимова, Т. С.** Экспериментальные исследования кососжимаемых железобетонных и фиброжелезобетонных элементов [Текст] / Т. С. Евдокимова, В.И. Морозов // «Вестник гражданских инженеров» СПбГАСУ. – СПб, 2015 – №6 (53). Стр. 37–41. (0,3125 п.л. / 0,2 п.л.)

4. **Евдокимова, Т. С.** Расчет несущей способности фиброжелезобетонных изгибаемых элементов с учетом работы растянутой зоны фибробетона [Текст] / Э.К. Опбул, Т. С. Евдокимова // «Вестник гражданских инженеров» СПбГАСУ. – СПб, 2016 – №3 (56). Стр. 67–71. (0,3125 п.л. / 0,15 п.л.)

Публикации в других изданиях

5. **Евдокимова, Т. С.** К расчету прочности фиброжелезобетонных элементов прямоугольного сечения при воздействии косоугольного внецентренного сжатия [Текст] / Т.С. Евдокимова // Доклады 70-й научной конференции профессоров, преподавателей, научных работников, инженеров и аспирантов университета: в 3 ч.; СПбГАСУ. – СПб. – 2014. – С. 17-22. (0,375 п.л.)

6. **Евдокимова, Т. С.** Фиброжелезобетонные конструкции в условиях косоугольного внецентренного сжатия [Текст] / Т.С. Евдокимова // Материалы конференции III Международного конгресса «Актуальные проблемы современного строительства»; СПбГАСУ. – СПб. – 2014. – С. 312-315. (0,25 п.л.)

7. **Евдокимова, Т. С.** Расчет фиброжелезобетонного элемента в условиях косоугольного внецентренного сжатия [Текст] / Т.С. Евдокимова, В.И. Морозов // Материалы 68-й международной научно-практической конференции «Актуальные проблемы современного строительства»; СПбГАСУ. – СПб. – 2015. – С. 333-338. (0,375 п.л. / 0,1875 п.л.)

8. **Евдокимова, Т. С.** Исследование напряженно-деформированного состояния кососжимаемого фиброжелезобетонного элемента [Текст] / Т.С. Евдокимова // Доклады 71-й научной конференции профессоров, преподавателей, научных работников, инженеров и аспирантов университета: в 3 ч.; СПбГАСУ. – СПб. – 2015. – С. 56-59. (0,25 п.л.)

9. **Евдокимова, Т. С.** Экспериментальные исследования особенностей поведения фибробетона при растяжении [Текст] / Т.С. Евдокимова // Сборник докладов IX Академических чтений РААСН – Международной конференции «Долговечность, прочность и механика разрушения бетона, железобетона и других строительных материалов». – Санкт-Петербург: СПбГАСУ, 2016. – с. 100-103. (0,25 п.л.)

Публикации в зарубежных изданиях

10. **Evdokimova T.** Experimental diagrams of fiber concrete straining under tension and compression and their implementation in calculation of bearing capacity of fiber-reinforced concrete flexural elements [Текст] / Evdokimova T., Morozov V., Opbul E., Khagai A. // Materials Science Forum, Vol. 871, 2016. С. 160-165. (0,375 п.л. / 0,1 п.л.)