

На правах рукописи



ТАМОВ Мурат Мухамедович

**МЕТОДОЛОГИЯ РАСЧЕТА ИЗГИБАЕМЫХ КОНСТРУКЦИЙ
ИЗ СВЕРХВЫСОКОПРОЧНОГО ФИБРОБЕТОНА
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЦИФРОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ**

2.1.1. Строительные конструкции, здания и сооружения

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Ростов-на-Дону – 2026

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Кубанский государственный технологический университет» (ФГБОУ ВО «КубГТУ»)

Научный консультант – МАИЛЯН Левон Рафаэлович, заслуженный строитель Российской Федерации, академик РААСН, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Строительство уникальных зданий и сооружений» ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет».

Официальные оппоненты:

СЕЛЯЕВ Владимир Павлович, академик РААСН, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой строительных конструкций ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарева»;

КОЛЧУНОВ Владимир Иванович, член-корреспондент РААСН, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры инженерной графики и компьютерного моделирования ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет»;

АНПИЛОВ Сергей Михайлович, доктор технических наук, доцент, ведущий научный сотрудник испытательного центра строительных конструкций кафедры железобетонных конструкций ФГБОУ ВО «Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин)».

Ведущая организация – ФГБУН Комплексный научно-исследовательский институт им. Х.И. Ибрагимова Российской академии наук.

Защита состоится «25» сентября 2026 г. в 10:00 на заседании диссертационного совета 24.2.297.02, созданного на базе ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет» (ДГТУ), по адресу: 344022, г. Ростов-на-Дону, ул. Социалистическая, 162, корп. 26, ауд. 306.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Донского государственного технического университета и на сайте <https://donstu.ru/>

Автореферат разослан «___» _____ 2026 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
доктор технических наук, доцент



Стельмах Сергей Анатольевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Сверхвысокопрочный фибробетон и композитная полимерная арматура являются новыми и перспективными строительными материалами. Область их применения – критически важные объекты транспортной инфраструктуры (мосты, эстакады, туннели), морские, промышленные и оборонные сооружения. Строительные конструкции таких объектов характеризуются высокой ответственностью, а особенностью их эксплуатации является сочетание высоких нагрузок и агрессивных воздействий окружающей среды. Эффективность использования сверхвысокопрочного фибробетона и композитной арматуры в таких случаях обусловлена их повышенными характеристиками и стойкостью к коррозии. Увеличение стоимости строительства из-за более высокой цены сверхвысокопрочного фибробетона и композитной арматуры в сравнении с традиционными бетоном и арматурой в полной мере перекрывается большей долговечностью и сокращением затрат на обслуживание и восстановление конструкций на протяжении их жизненного цикла, а также снижением расхода материалов.

Действующие нормы проектирования конструкций из высокопрочного бетона не распространяются на фибробетон, а в нормах проектирования фибробетонных конструкций прочность бетона задается существенно ниже прочности сверхвысокопрочного фибробетона. Теоретические и экспериментальные исследования сопротивления конструкций из сверхвысокопрочного фибробетона представлены единичными примерами. То же относится и к конструкциям с композитной арматурой, исследованным лишь при действии изгибающего момента. Работа при действии поперечных сил наклонных сечений с композитной арматурой, где ее особенности способны оказать большое влияние на напряженно-деформированное состояние, практически не изучена, хотя как раз хомуты имеют меньший защитный слой бетона и потому в большей мере подвержены воздействиям окружающей среды.

Для широкого внедрения в практику строительства несущих конструкций из сверхвысокопрочного бетона со стальной фиброй и армированных композитной полимерной арматурой необходимы исследования напряженно-деформированного состояния, несущей способности и трещиностойкости изгибаемых конструкций из этих материалов и построение научно обоснованной методологии расчета с использованием цифровых технологий, что определяет актуальность решения данной научной проблемы.

Работа выполнялась в соответствии с тематическим планом Минобрнауки РФ «Исследование механизма прочности существующих и реконструируемых железобетонных элементов при переменных схемах загрузки» (НИР 1.7.10), поддержана «Ползуновским грантом», программой «УМНИК» Фонда содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере, грантами РФФИ, Кубанского научного фонда, премией «IQ года» Краснодарского края, стипендией Президента Российской Федерации для обучения за рубежом.

Соответствие паспорту специальности. Работа соответствует пп. 1, 2, 3, 8 паспорта специальности 2.1.1. Строительные конструкции, здания и сооружения:

1. Построение и развитие теории, разработка аналитических и вычислительных методов расчета механической безопасности и огнестойкости, рационального проектирования и оптимизации конструкций и конструктивных систем зданий и сооружений.

2. Разработка физических и численных методов экспериментальных исследований конструктивных систем, несущих и ограждающих конструкций, конструктивных свойств материалов.

3. Развитие теории и методов оценки напряженного состояния, живучести, риска, надежности, остаточного ресурса и сроков службы строительных конструкций, зданий и сооружений, в том числе при чрезвычайных ситуациях, особых и запроектных воздействиях, обоснование критериев приемлемого уровня безопасности.

8. Разработка новых и совершенствование рациональных типов несущих и ограждающих конструкций, конструктивных решений зданий и сооружений с учетом протекающих в них процессов, природно-климатических условий, механической, пожарной и экологической безопасности.

Степень разработанности темы исследования. Обзор отечественных и зарубежных научных работ и нормативной базы показал, что методология расчетов изгибаемых конструкций из сверхвысокопрочного фибробетона и с композитной арматурой на сегодня остается недостаточно проработанной. Слабо исследованной областью для конструкций с композитной арматурой является их работа при действии поперечной силы, для конструкций из сверхвысокопрочного фибробетона – работа при действии поперечной силы и изгибающего момента. Существующие методы проектирования и расчета, как правило, основаны на упрощенных моделях, не учитывающих специфические свойства сверхвысокопрочного фибробетона и композитной арматуры.

Анализ показал, что развитие методов расчета в этой области главным образом направлено на применение средств численного моделирования с опорой на экспериментальные данные, используемые для определения отдельных параметров работы конструкций и валидации расчетных моделей. Вместе с тем, существующие разработки, как правило, носят фрагментарный характер и не формируют комплексного подхода к расчету. При этом остается нерешенной проблема формирования системного подхода к привлечению цифровых технологий для оценки напряженно-деформированного состояния изгибаемых конструкций из сверхвысокопрочного фибробетона и с композитной полимерной арматурой.

Цель исследования – разработка методологии расчета прочности, деформативности и трещиностойкости нормальных и наклонных сечений изгибаемых конструкций из сверхвысокопрочного фибробетона и с композитной арматурой с использованием цифровых технологий.

Задачи исследования:

- провести анализ и обобщить отечественные и зарубежные исследования и нормативные подходы к расчету изгибаемых конструкций из сверхвысокопрочного фибробетона и с композитной арматурой по нормальным и наклонным сечениям;
- провести экспериментальные исследования работы сверхвысокопрочного фибробетона, композитной арматуры и изгибаемых конструкций из этих компонентов под нагрузкой;
- сформировать представительную экспериментальную базу данных, включающую результаты других авторов, для разработки и проверки методологии расчета;
- выявить особенности силового сопротивления балок прямоугольного и двутаврового сечений из сверхвысокопрочного фибробетона и с композитной арматурой при действии изгибающего момента и поперечной силы;
- установить особенности работы сверхвысокопрочного бетона и фибробетона под нагрузкой с построением диаграмм деформирования этих материалов;
- рассмотреть применение современных цифровых технологий (метода конечных элементов, нейросетевого и регрессионного анализа) для расчета изгибаемых конструкций на поперечную силу;
- разработать и обосновать методологию расчета балок из сверхвысокопрочного фибробетона и с композитной арматурой по нормальным и наклонным сечениям с применением современных цифровых инструментов;
- провести проверку и оценку точности созданной методологии расчета прочности, деформативности и трещиностойкости изгибаемых конструкций из сверхвысокопрочного фибробетона и с композитной арматурой по результатам собственных испытаний и данным других авторов.

Научная новизна работы заключается в построении научных основ силового сопротивления по нормальным и наклонным сечениям изгибаемых конструкций из сверхвысокопрочного фибробетона и с композитной арматурой с использованием цифровых технологий, а именно:

- получены новые экспериментальные данные и выявлены особенности работы балок прямоугольного и двутаврового сечений из сверхвысокопрочного фибробетона и с композитной арматурой с вертикальным и наклонным поперечным армированием при различном содержании фибр при действии изгибающего момента и поперечной силы;
- проведена модернизация известных нелинейных моделей деформирования применительно к описанию механического состояния сверхвысокопрочного бетона с фибрами и без них под нагрузкой;
- обосновано использование средних значений деформаций сверхвысокопрочного фибробетона и арматуры для применения гипотезы плоских сечений при расчете изгибаемых элементов с трещинами;
- установлена зависимость сопротивления наклонных сечений и тонких стенок балок из сверхвысокопрочного фибробетона и с композитной арматурой от пролета среза, параметров продольного и поперечного армирования, фибро-

вого армирования, ширины свесов сжатой полки сечения; предложен коэффициент снижения прочности тонких стенок двутавровых балок из-за наличия трещин от предшествующих нагрузок;

- создана методология расчета прочности, деформативности и трещиностойкости изгибаемых конструкций из сверхвысокопрочного фибробетона и с композитной арматурой по нормальным и наклонным сечениям на основе цифровых технологий;

- разработаны инженерные методики расчета прочности балок прямоугольного и двутаврового сечений из сверхвысокопрочного фибробетона и с композитной арматурой при действии поперечных сил с учетом деформативных характеристик бетона и арматуры, коэффициентов стержневого и фибрового армирования, угла наклона поперечной арматуры, пролета среза и предыстории нагружения;

- выявлены особенности работы вертикальных и наклонных композитных стержней армирования в наклонных трещинах благодаря испытаниям по предложенной новой методике и конечно-элементным расчетам с представлением композитной арматуры в модели элементами с ортотропными деформативными свойствами;

- предложено применение обратного моделирования для определения параметров закона деформирования сверхвысокопрочного фибробетона в растянутой зоне при диаграммном методе расчета изгибаемых конструкций;

- разработаны методики нелинейных конечно-элементных расчетов балок прямоугольного и двутаврового сечений из сверхвысокопрочного фибробетона и с композитной арматурой при действии поперечных сил, включая случаи с предысторией нагружения, основанные на деформационных моделях железобетона при плоском напряженно-деформированном состоянии и диаграммах деформирования композитных материалов;

- разработаны эффективные конструктивные решения облегченных двутавровых балок с малыми толщинами полок и стенок и трехслойных навесных панелей с гибкими композитными связями из сверхвысокопрочного фибробетона и с композитной арматурой.

Теоретическая значимость работы:

- развиты научные основы силового сопротивления по нормальным и наклонным сечениям изгибаемых конструкций из сверхвысокопрочного фибробетона и с композитной арматурой с учетом особенностей работы материалов и характера трещинообразования, включая влияние предыстории нагружения, с использованием нейросетевых и конечно-элементных программных комплексов;

- выявлены закономерности сопротивления наклонных сечений и тонких стенок балок в зависимости от конструктивных параметров и схемы нагружения;

- развиты подходы к диаграммным методам расчета балок из сверхвысокопрочного фибробетона за счет синтеза и адаптации диаграмм деформирования и деформационных моделей для плоского напряженно-деформированного состояния, в том числе с идентификацией параметров диаграмм деформирования по результатам испытаний балок.

Практическая значимость работы:

- усовершенствованы инженерные подходы к расчету и конструированию изгибаемых элементов из сверхвысокопрочного фибробетона и с композитной арматурой, обеспечивающие надежность проектных решений и снижающие материалоемкость конструкций, что способствует их внедрению в строительство;
- доказана эффективность фибрового армирования балок из сверхвысокопрочного бетона волновыми фибрами, формул для расчета сопротивления поперечным силам по наклонным сечениям и по бетонным полосам с учетом влияния конструктивных параметров и пролета среза, введенных коэффициентов к несущей способности балок с начальными трещинами в стенке;
- построена методика регрессионного анализа влияния независимых переменных на сопротивление наклонных сечений изгибаемых конструкций;
- представлена методика нейросетевого анализа силового сопротивления наклонных сечений балок из сверхвысокопрочного фибробетона в зоне совместного действия поперечной силы и изгибающего момента.

Методология и методы исследования – экспериментальные исследования и последующее численное моделирование изгибаемых конструкций из сверхвысокопрочного фибробетона и с композитной арматурой. Испытания проведены с сертифицированными приборами и измерительным оборудованием, а также с оригинальным оборудованием автора, защищенным 4 патентами РФ (№ 163303, № 114154, № 215721, № 215722). Конечно-элементные расчеты выполнены в программных комплексах ABAQUS, OpenSees и ANSYS, статистическая обработка и построение регрессионных и нейросетевых моделей – в пакете STATISTICA. Программные коды разрабатывали на языках TCL и C++, сборку приложения – в среде Microsoft Visual Studio.

Положения, выносимые на защиту:

- результаты широкомасштабных экспериментальных и численных исследований прочности, деформативности и трещиностойкости прямоугольных и двутавровых балок из сверхвысокопрочного фибробетона и с композитной арматурой с вертикальным и наклонным поперечным армированием, включая тонкие стенки, нормальные и наклонные сечения, опорные зоны при нагружении с изменением пролета среза;
- закономерности сопротивления балок прямоугольного и двутаврового сечений из сверхвысокопрочного фибробетона и с композитной арматурой изгибающему моменту и поперечной силе, включая особенности трещинообразования и формы разрушения, при варьировании параметров стержневого и фибрового армирования в широких пределах;
- комплекс методов расчета прочности, деформативности и трещиностойкости изгибаемых конструкций из сверхвысокопрочного фибробетона и с композитной арматурой по нормальным и наклонным сечениям на основе цифровых технологий: искусственных нейронных сетей, сформированных по представительной экспериментальной базе и проверенных на тестовых и контрольных выборках в широких диапазонах конструктивных параметров и схем; ко-

нечно-элементных расчетов нормальных и наклонных сечений с предысторией нагружения, использующих деформационные модели железобетона при плоско напряженно-деформированном состоянии и диаграммы деформирования композитных материалов; инженерных расчетов с учетом характеристик материалов, пролетов среза, начальных трещин, содержания фибр, поперечного армирования и углов его наклона;

– конструктивные решения облегченных двутавровых балок с малыми толщинами полок и стенок и трехслойных навесных панелей с гибкими композитными связями из сверхвысокопрочного фибробетона и с композитной арматурой.

Степень достоверности результатов подтверждается использованием в экспериментальных исследованиях поверенных приборов и регистрирующего оборудования, применением известных принципов строительной механики, апробированных статистических методов при анализе опытных данных, использованием общепризнанных программных комплексов при выполнении численных расчетов. Результаты расчетов по разработанной методологии подтверждаются хорошей сходимостью с опытными и численными данными по прочности, деформативности и трещиностойкости балок из сверхвысокопрочного фибробетона и с композитной арматурой, полученными как автором, так и другими исследователями.

Апробация результатов. Основные материалы работы доложены и одобрены на международных и всероссийских научных конференциях: КубГТУ (Краснодар, 2012–2025), «Строительство в прибрежных курортных регионах» (Сочи-VI, 2010), «Эффективные строительные конструкции: теория и практика» (Пенза-X, 2010), «Строительство-2011...2024» (Ростов н/Д, 2011...2024), Техасской секции Американского общества гражданского строительства (Сан-Антонио, Техас, США, 2012), «Строительство – формирование среды жизнедеятельности» (Москва, 2018–2020), «Девелопмент и инновации в строительстве» (Краснодар, 2018), «Actual issues of mechanical engineering» (Новосибирск, 2018), «Modelling and Methods of Structural Analysis» (Москва, 2021), «Materials Physics, Building Structures and Technologies in Construction, Industrial and Production Engineering» (Владимир, 2022, 2026), «Актуальные вопросы строительства: взгляд в будущее» (Красноярск, 2022), «Технические науки: проблемы и решения» (Москва, 2022), «Прикладная математика и информатика в современном мире» (Краснодар, 2022), Кубанского научного фонда (Сочи, 2021, 2022), XXXVIII «Современные научные исследования. Актуальные вопросы, достижения и инновации» (Пенза, 2024), «Современные бетоны и технологии: проблемы, решения, перспективы» (Краснодар, 2025).

Опытные балки из сверхвысокопрочного фибробетона были представлены на выставке Yug Build-2021.

По результатам исследований под руководством автора подготовлены 3 кандидатские диссертации – С.В. Усанова (Ростов н/Д, ДГТУ, 2023), М.И.Ф. Салиба (Ростов н/Д, ДГТУ, 2025) и Ю.К.И. Абуизеиха (Ростов н/Д, ДГТУ, 2026).

Публикации. По материалам диссертации опубликованы 50 печатных работ, в т.ч. 20 статей в изданиях ВАК, 7 статей в изданиях Scopus и Web of Science, 4 патента РФ, 2 монографии и 17 публикаций в других изданиях.

Структура и объем работы. Диссертация объемом 314 страниц машинописного текста состоит из введения, семи глав, заключения, списка литературы из 331 наименования, трех приложений, содержит 166 рисунков и 42 таблицы.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснованы актуальность темы диссертационного исследования, его цель и задачи, научная новизна, представлены теоретическая и практическая значимость, степень разработанности темы, методология и методы исследования, приведены данные о степени достоверности и апробации результатов, публикациях, структуре и объеме работы.

В первой главе раскрыта необходимость разработки новых методов расчета сопротивления изгибаемых конструкций из сверхвысокопрочного фибробетона (СВПБ) и с композитной полимерной арматурой (АКП) с использованием цифровых технологий, включая искусственные нейронные сети (ИНС), регрессии и аппарат метода конечных элементов (МКЭ). Изучены труды отечественных и зарубежных исследователей по теме работы. Представлены способы получения СВПБ и их физико-механические и конструктивные свойства, особенности АКП и ее характеристики. Обобщены результаты исследований поведения изгибаемых СВПБ-конструкций со стержневым и фибровым армированием и конструкций с использованием АКП. Проанализированы существующие методы расчета изгибаемых конструкций из высокопрочных и сверхвысокопрочных композитных материалов по предельным состояниям.

Значительный вклад в разработку составов и исследование свойств сверхвысокопрочных бетонов и фибробетонов внесли О.Я. Берг, В.Т. Ерофеев, А.С. Иноземцев, В.И. Калашников, С.С. Каприелов, Н.И. Карпенко, В.С. Лесовик, Н.И. Макридин, Г.В. Несветаев, Ю.В. Пухаренко, О.В. Тараканов, А.Д. Толстой, А.В. Шейнфельд, Р. Борнеманн, П. Буителарр, Дж. Варлавен, Т. Герлихер, А. Кумар, Ф. Ларард, Д. Левке, Т. Лютбехер, О. Мацанек, Т. Седран, Дж. Сяо, Л. Урбонач, С. Фабер, Э. Фелинг, С. Фролих, Д. Хейнц, И. Чжу, Р. Шисль, М. Шмидт и др. Исследования НДС нормальных сечений конструкций из СВПБ выполнялись школами В.И. Травуша, Н.И. Карпенко, Вл. И. Колчунова, В.С. Федорова, Б. Грейбила, З. Каи, С. Каханджи, Х.-С. Ли, С. Ченга, И. Шао, И.Х. Янга и др. Экспериментальные и теоретические работы в области прочности наклонных сечений СВПБ-балок были у Ф. Бэби, Р. Загона, В. Пансука, Н. Рандла, Дж. Тиёмике и др. Нормы по проектированию СВПБ-конструкций к настоящему времени разработаны во Франции, Японии, Германии и Южной Корее.

Применению композитной арматуры посвящены исследования Г.М. Андреевской, С.М. Анпилова, И.Н. Ахвердова, Ю.М. Вильдавского, А.А. Гвоздева, С.С. Жаврида, Д.А. Ильина, Д.Р. Маиляна, Н.А. Мощанского, П.П. Польского, В.П. Селяева, А.Г. Тамразяна, Н.П. Фролова, М. Атитуса, М. Будвитиса,

Дж. Валивониса, Г. Манфреди, Т. Нагасаки, А. Нанни, Э. Оллера, А. Прота, М. Танигаки, А. Туруйена, Р. Фико, Р. Фроша, Х. Фукуямы, Л. Юнкевичиса и др. Сведения о производстве и применении АКП для конструкций обобщены В.Ф. Степановой. Исследования балок с АКП обычно посвящены прочности и трещиностойкости лишь нормальных сечений, а наклонных же представлены только отдельными работами Е. Ахмеда, Б. Бенмокрейна, М. Курта, Р. Морфи, С. Ризкалла, Е.Ф. Салаквей, Дж. Хеггера, Э. Шехаты и др.

Совершенствование методов расчета является важнейшим направлением исследований конструкций из СВПБ и АКП. Развитие теоретических моделей нередко приводит к их чрезмерной сложности. Составленные на основе этих моделей строгие аналитические решения зачастую громоздки и неудобны в практическом применении, из-за чего оказываются невостребованными инженерным сообществом и остаются лишь в сфере интересов научных работников.

Появление и повсеместное распространение компьютеров сделало возможным становление большого числа эффективных программных комплексов, реализующих МКЭ для решения физически и геометрически нелинейных задач механики деформируемых твердых тел. На сегодня эти программные комплексы являются основным общепризнанным инструментом для расчета строительных конструкций зданий и сооружений.

Накопленный значительный объем экспериментальных и численных исследований конструкций – то, что можно назвать «архивом науки», – открыл путь к новому этапу – анализу поведения конструкций как области науки, основанной на большом объеме данных. Для сложных НДС конструкций из композитных материалов инструменты искусственного интеллекта способны выявлять скрытые закономерности и оптимизировать процессы расчета.

Исходя из этого, в качестве вектора исследования принята разработка методологии расчета балок из СВПБ и АКП по нормальным и наклонным сечениям, основанной на синтезе экспериментальных данных и цифровых расчетных инструментов – аппарата МКЭ, методов регрессионного анализа и нейросетевого прогнозирования.

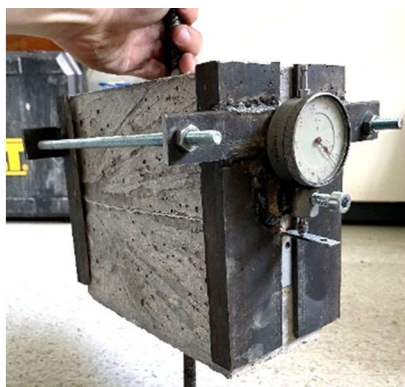
Таким образом, проведенные обзор и анализ существующих исследований позволили сформировать обобщенное представление о современном состоянии вопроса сопротивления нормальных и наклонных сечений изгибаемых железобетонных конструкций из СВПБ и АКП. На основании этого были определены принципиальные направления совершенствования методов расчета, а также сформулированы цель исследования, задачи и этапы их реализации.

Во второй главе «Комплексные экспериментальные исследования железобетонных конструкций из высокопрочных и сверхвысокопрочных материалов» составлена программа системных исследований СВПБ и АКП и балок, изготовленных с их применением, с целью получения экспериментальных данных о прочности, деформативности и трещиностойкости нормальных и наклонных сечений и последующей разработки и обоснования методологии расчета (таблица 1).

Таблица 1 – Содержание программы экспериментальных исследований

Цель	Тип образцов	Число испытаний
Определение характеристик сверхвысокопрочных бетонов и композитной арматуры	1. Контрольные образцы СВПБ	26 составов бетона
	2. Специальные образцы АКП для определения влияния изгиба в наклонных трещинах	28
Исследование прочности, деформативности и трещиностойкости СВПБ-балок при действии изгибающего момента	Балки прямоугольного сечения из сверхвысокопрочного бетона со стержневым и фибровым армированием	17
Исследование сопротивления приопорных зон двутавровых ж.б. балок из обычного бетона, включая влияние предыстории нагружения	Эталонные и опытные (с начальными трещинами) двутавровые ж.б. балки	30
Исследование сопротивления наклонных сечений двутавровых балок из СВПБ	Двутавровые балки из сверхвысокопрочного бетона со стержневым и фибровым армированием наклонных сечений	14
Исследование прочности тонких стенок двутавровых ж.б. балок с поперечным композитным армированием	Эталонные (стальная поперечная арматура) и опытные (композитная поперечная арматура) двутавровые ж.б. балки	20
Исследование сопротивления наклонных сечений прямоугольных ж.б. балок с поперечным композитным армированием	Эталонные (стальная поперечная арматура) и опытные (композитная поперечная арматура) балки прямоугольного сечения	8

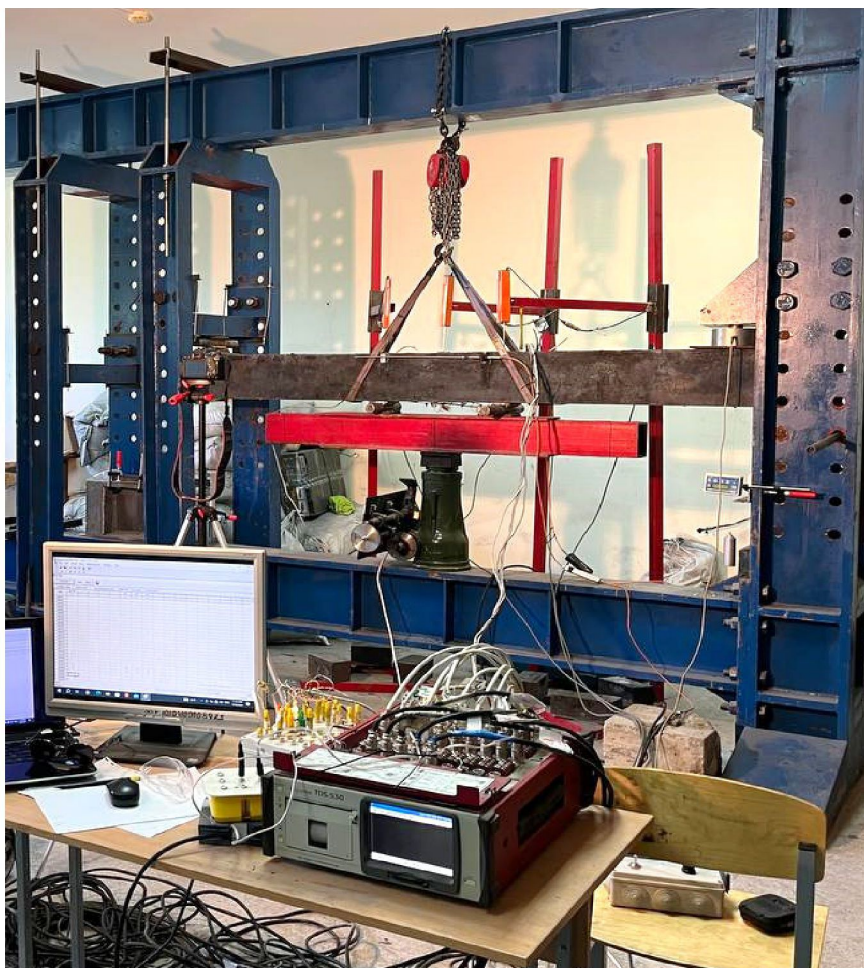
Предложена новая схема оптимизации состава СВПБ с последовательным «наращиванием» компонентов при выборе их соотношений для получения самоуплотняющихся смесей сверхвысокопрочного бетона и сталефибробетона. Для испытаний композитной арматуры, имитирующих ее работу в наклонной трещине, рекомендована новая методика, заключающаяся в испытании на растяжение армированных призматических бетонных образцов с установленными в них стержнями АКП и искусственной трещиной под заданным углом (рисунок 1, а). Экспериментальные исследования работы нормальных и наклонных сечений включали испытание 89 балок прямоугольного и двутаврового сечений с варьированием в широких диапазонах прочности бетона, коэффициентов фибрового и стержневого армирования стальной и композитной арматурой, угла наклона поперечной арматуры, пролетов среза загрузки и типов фибр. Для реализации программы исследований разработана система оригинального экспериментального оборудования – универсальные опалубочные (рисунок 1, б) и рычажно-рамные установки (рисунок 1, в) – для изготовления и испытания изгибаемых элементов прямоугольного и двутаврового сечений из СВПБ (получено 4 патента РФ).



а)



б)



в)

Рисунок 1 – Особенности методики экспериментальных исследований:
а – образец для испытания АКП; б – опалубка с закрепленными на ней формообразователями; в – проведение испытаний балок

В третьей главе «Новые подходы к расчету железобетонных изгибаемых конструкций из высокопрочных и сверхвысокопрочных материалов на основе цифровых технологий» предложены общие принципы расчетной оценки НДС конструкций из СВПБ и АКП при различных силовых воздействиях, выбраны базовые системные программные комплексы и принципиальные подходы к конечно-элементной оценке НДС балок, расчету прочности стенок и наклонных сечений балок с применением ИНС и регрессионного анализа, представлена последовательность проверок разработанных методов расчета: этапы проверок и их синергия, порядок формирования валидационного базиса.

К расчету изгибаемых железобетонных элементов применен комплексный подход, использующий три группы цифровых расчетных инструментов (рисунок 2): конечно-элементные, нейросетевые и регрессионные.

Для развития методов расчета *на основе МКЭ* избраны базовые системные программные комплексы: для балок прямоугольного сечения – программный комплекс ABAQUS, для балок двутаврового сечения – программная платформа OpenSees, представляющая собой объектно-ориентированную систему с открытым кодом.

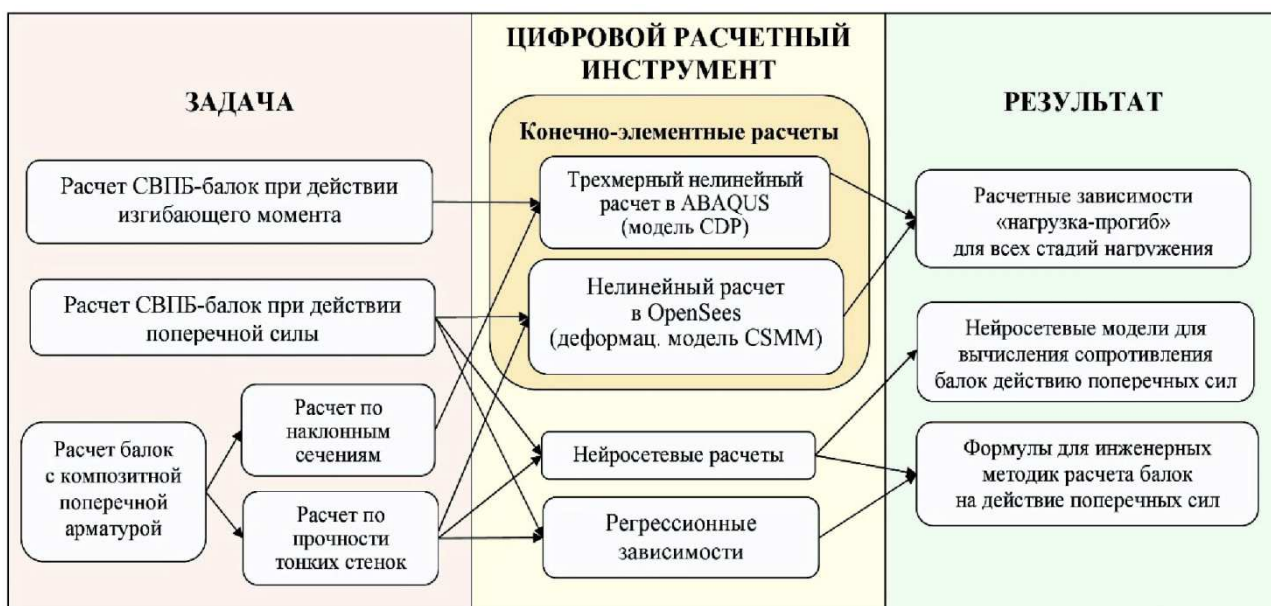


Рисунок 2 – Схема комплексного подхода к расчету конструкций из высокопрочных и сверхвысокопрочных композитных материалов

По результатам анализа исследований определены рациональные модели СВПБ и АКП. Для бетона в ABAQUS при расчетах по нормальным и наклонным сечениям *прямоугольных балок* принята модель пластического деформирования с накоплением повреждений (CDP). Для диаграммы деформирования СВПБ при растяжении предложена калибровка подбором координат параметрических точек диаграммы Н. Хоффмана, обеспечивающих лучшее совпадение результатов расчета и испытаний балок.

Наряду с диаграммами деформирования при сжатии и растяжении поведение бетона в модели CDP определяется параметрами ϵ , μ , K_c , σ_{b0}/σ_{c0} и ψ . В ранее выполненных исследованиях, где модель была применена для СВПБ, значения этих параметров варьируются в достаточно широких диапазонах. С учетом задач нашей работы оптимальные значения параметров подобраны калибровкой по результатам расчетов СВПБ-балок.

Для КЭ-расчетов *двутавровых балок* применена деформационная модель CSMM, описывающая плоское НДС железобетонных элементов совокупностью уравнений равновесия и совместности деформаций и диаграммами деформирования. Модель интегрирована в программную платформу OpenSees классами материалов для обычного тяжелого бетона и размещенной в нем арматуры. Эти материалы использованы для расчетов балок из обычного бетона со стальной и композитной поперечной арматурой при одностадийных и двухстадийных нагружениях с изменением пролета среза. Для расчетов СВПБ-балок они непригодны, в связи с чем в OpenSees нами были введены новые расчетные материалы СВПБ ConcreteM01 и размещенной в нем арматуры SteelM01 (рисунок 3). Диаграммы деформирования СВПБ этих материалов взяты по Ю. Жангу и дополнены коэффициентами разупрочнения. В код программы на портале GitHub внесены дополнения в среде Microsoft Visual Studio, и затем произведена сборка приложения в исполняемый файл.

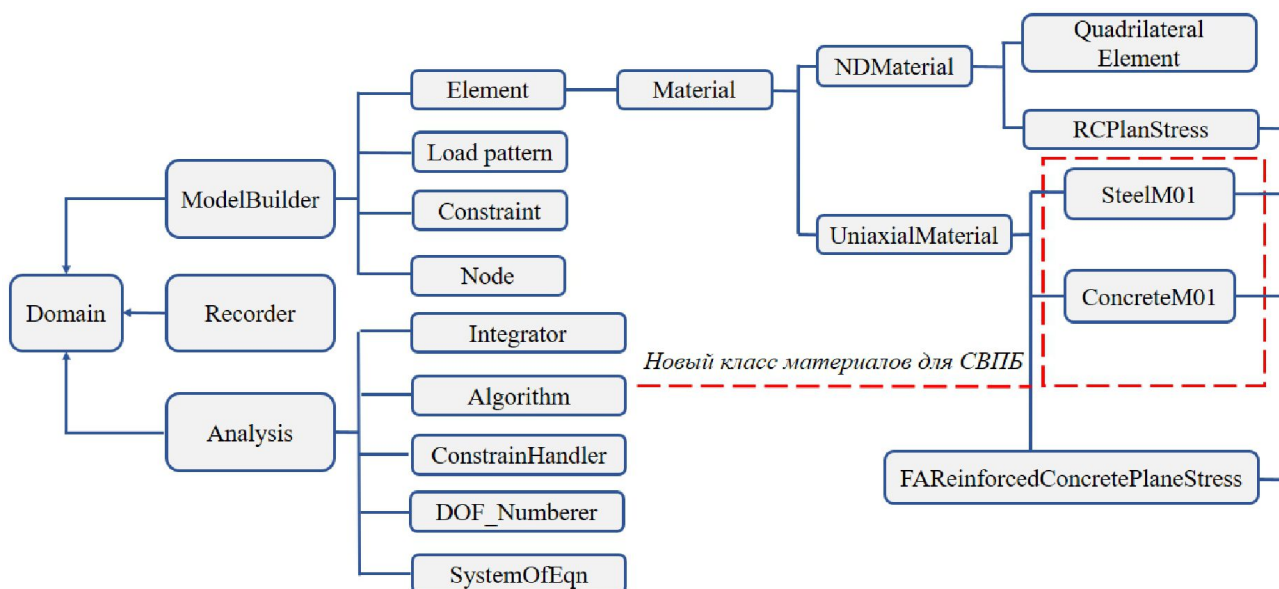
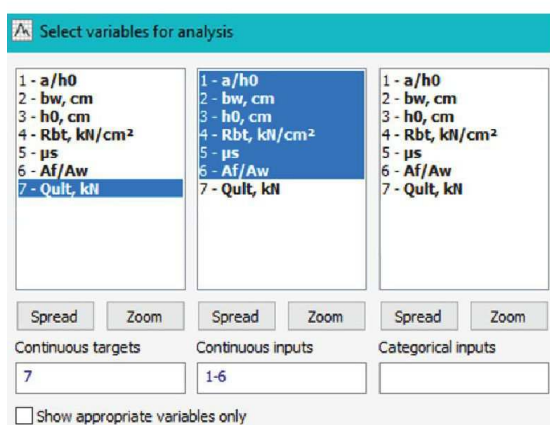


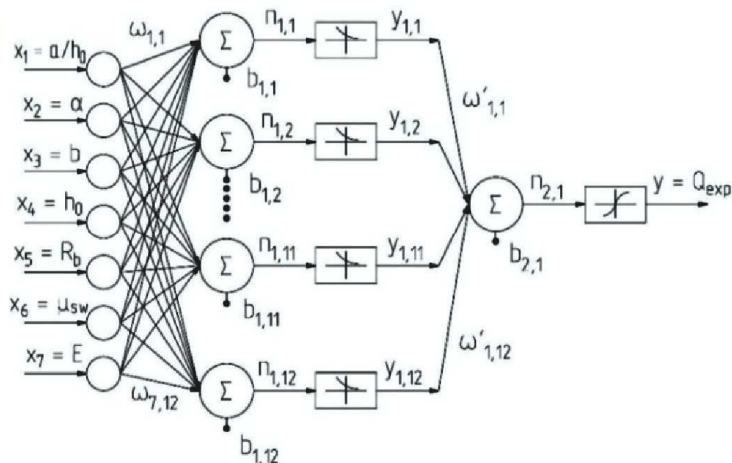
Рисунок 3 – Структура OpenSees

Для расчета балок на поперечные силы разработаны методы, основанные **на регрессионном анализе и нейросетевом прогнозировании**, с использованием данных собственных экспериментальных исследований, а также других авторов, проводивших аналогичные испытания, что позволило получить широкую выборку по всем рассматриваемым показателям. Для построения ИНС применен один из наиболее популярных программных продуктов STATISTICA Neural Networks (StatSoft), встроенный в набор других аналитических средств программы, что позволяет использовать общие исходные данные для различных методов анализа.

Входной слой созданных ИНС состоял из 6–7 независимых переменных – параметров конструкций и схемы нагружения, оказывающих влияние на прочность стенок и наклонных сечений (рисунок 4, а).



а)



б)

Рисунок 4 – Независимые и зависимые параметры (а) и архитектура (б) ИНС

Выходной слой включал одну зависимую переменную – разрушающую поперечную силу. Выборки для обучения и тестирования сетей включали данные

собственных и чужих экспериментальных исследований, благодаря чему количество испытаний являлось достаточным для обеспечения их статистической значимости. Проценты обучающей, тестовой и контрольной партий принимали стандартными. Архитектурой нейронных сетей служил многослойный персептрон с одним промежуточным слоем, содержащим от 1 до 20 нейронов (рисунок 4, б). При построении сетей испробованы наборы функций активации нейронов (линейная, логарифмическо-сигмоидная и т. д.). Для повышения скорости сходимости алгоритма обучения нейронных сетей ко всем переменным моделей применена минимаксная нормализация. В качестве алгоритма обучения всех ИНС применяли квазиньютоновский метод численной оптимизации BFGS.

Регрессионные зависимости для расчета прочности стенок и наклонных сечений приняты множественными нелинейными. Регрессионный анализ применяли в сочетании с корреляционным. Задачей последнего являлось исследование направления и силы статистической связи признаков. Анализом общей чувствительности ИНС выявляли независимые переменные, имеющие наибольшее влияние на сопротивление балок. Визуальным анализом тернарного графика, построенного для наиболее значимых фактор-аргументов и зависимой переменной, проводили разведочный анализ данных на предмет наличия выбросов и незначимых данных и выбирали спецификацию регрессионной модели. При корреляционном анализе полученных параметров оценивали значимость коэффициентов корреляции и наличие мультиколлинеарности.

При подборе вида регрессии принимали во внимание, что предложенная функция должна быть подходящей для последующего преобразования в формулу для инженерной методики расчета сопротивления балок. При необходимости оптимизации формулы оценку качества регрессионного уравнения проводили повторно по гистограммам остатков и с помощью ANOVA.

С учетом принятой в нормах структуры формул регрессионный анализ для вычисления прочности наклонных сечений балок из сверхвысокопрочного бетона выполнен в два этапа. На первом получена зависимость для сопротивления балок без фибрового и стержневого поперечного армирования $Q = Q_b = f(x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6)$, где $x_1 (a/h_0)$, $x_2 (b_w)$, $x_3 (h_0)$, $x_4 (R)$, $x_5 (\mu_s)$, $x_6 (\varphi_f)$ – независимые фактор-аргументы; $\varphi_f = (b_f - b_w) \cdot t_f / (b_w \cdot h_0)$, на втором – формула для вклада фибр подбором параметров регрессии вида $Q = y + f(x_1, x_2, x_3, x_4)$, где y – вклад бетона Q_b по формуле первого этапа, $x_1 (b_w)$, $x_2 (h_0)$, $x_3 (R_{bt})$, $x_4 (\mu_s)$. На обоих этапах сначала выбирали функциональную форму, затем оценивали параметры и проверяли адекватность модели.

Первичными данными для формирования валидационного базиса являлись результаты собственных экспериментальных (глава 2) и численных (глава 4) исследований, а также материалы исследований других авторов (рисунок 5). Из совокупности данных по наборам критериев образованы выборки, послужившие основой для обучения ИНС и расчета параметров уравнений регрессии. Начальным этапом в КЭ-расчетах являлось создание моделей по известной геометрии, свойствам материалов, граничным условиям, армированию и пр. Последующей калибровкой моделей осуществляли их настройку и оптимиза-

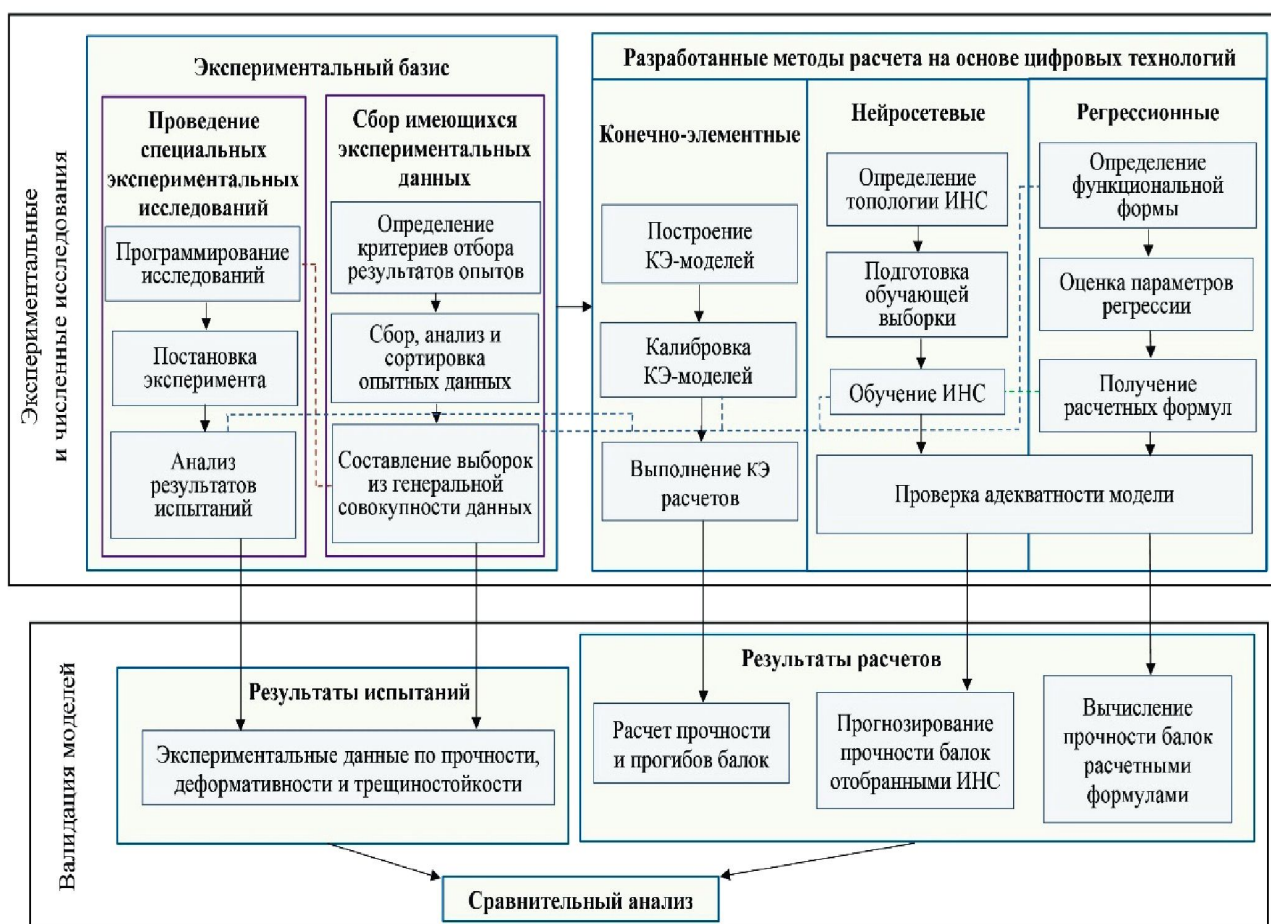


Рисунок 5 – Схема оценки достоверности разработанных методов расчета

цию. Калибровка включала системное уточнение параметров материалов и геометрических характеристик моделей, минимизирующее разницу между опытными и теоретическими результатами. Для оценки точности расчета по предлагаемым методикам с результатами экспериментальных исследований использовали различные инструменты математической статистики.

В четвертой главе «Численные исследования железобетонных изгибаемых конструкций из высокопрочных и сверхвысокопрочных материалов» приведены порядок создания, оптимизации и калибровки КЭ-моделей призматических образцов для исследования свойств АКП, балок прямоугольного и двутаврового сечений из СВПБ и АКП для расчета на действие изгибающего момента и поперечной силы, составлены и структурированы обширные представительные выборки экспериментальных исследований сопротивления поперечным силам балок из СВПБ и АКП.

Специальные образцы для исследования АКП в зоне пересечения наклонной трещиной рассчитывали в ПК ANSYS Workbench (рисунок 6). В зоне изгиба стержня стремились к созданию односторонней связи в направлении, перпендикулярном оси стержня, т. е. к такой связи, которая бы передавала сжимающие напряжения от стержня бетону и не препятствовала отрыву стержня от бетона с противоположной стороны. Это решение было реализовано применением связи типа «rough» между КЭ стержня и призмы.

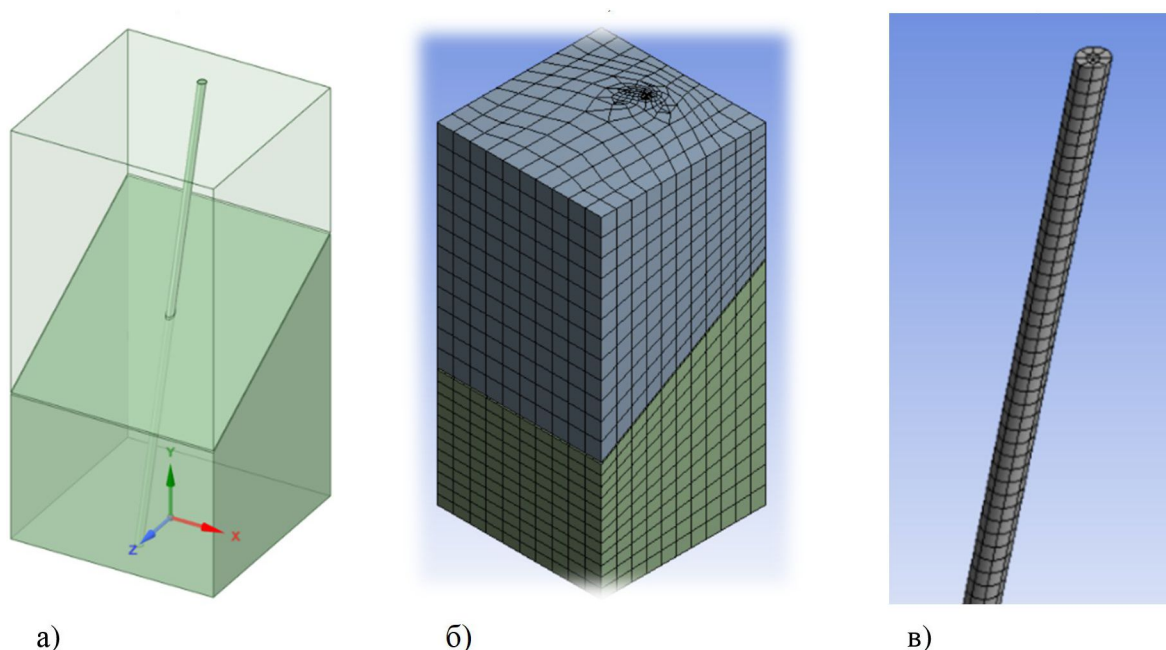


Рисунок 6 – Модель призматического образца (а), ее разбивка на КЭ (б), модель стержня (в)

Конечно-элементные расчеты балок прямоугольного и двутаврового сечений проводили в трехмерной постановке (рисунок 7, а, б).

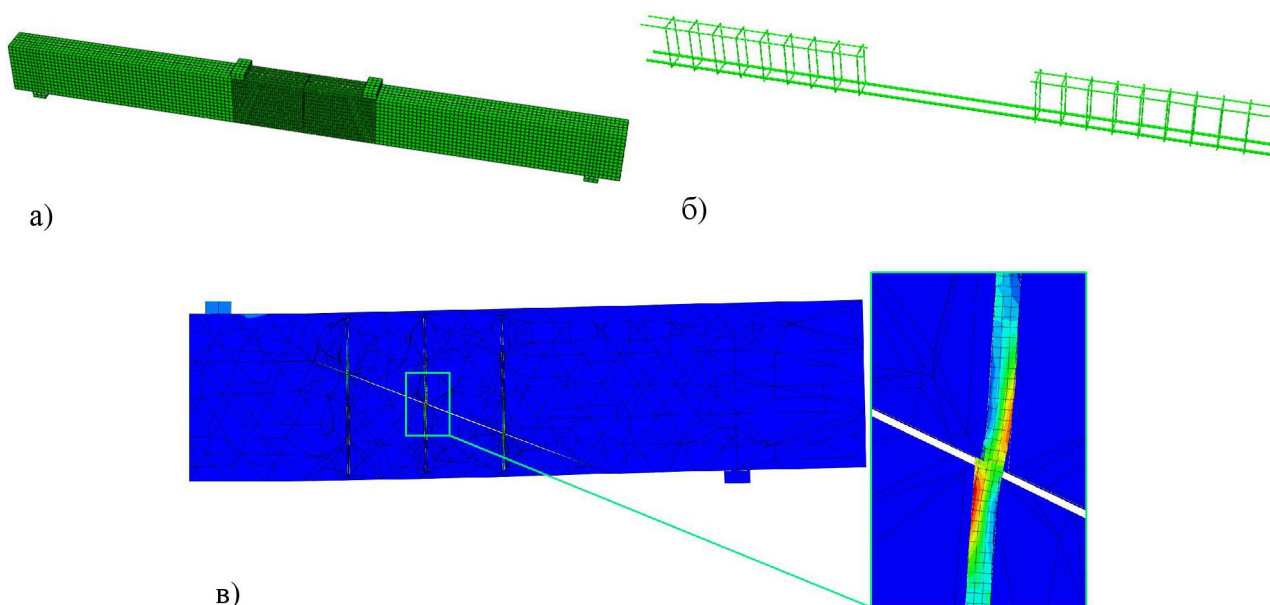


Рисунок 7 – Общий вид КЭ-модели (а), модель арматурного каркаса (б) и НДС композитного стержня в пересечении с трещиной (в)

В исследуемой зоне **прямоугольных балок** сетку КЭ в ABAQUS сгущали. При калибровке моделей для *расчета на изгиб* использовали принцип обратного моделирования: производили подбор координат параметрических точек диаграммы деформирования СВПБ при растяжении $\sigma_{bt} - \varepsilon_{bt}$, обеспечивающий наиболее близкое совпадение расчетных деформаций бетона в нормальных сечениях с деформациями, измеренными в ходе испытаний. При исследовании

работы на поперечные силы балок с композитными хомутами, разрушившихся по бетону над вершиной наклонной трещины, АКП моделировали стержневыми КЭ, а в балках с разрушением из-за разрыва хомутов – объемными КЭ. Кроме того, во втором случае в исследуемой зоне задавали искусственную трещину, проведенную под углом, зафиксированном при испытаниях (рисунок 7, в).

Для КЭ-расчетов составлена выборка из результатов испытаний СВПБ-балок, включавшая наши экспериментальные данные (глава 2), а также балки из других работ с одиночным и двойным армированием, разными типами фибр и их сочетаний, объемным содержанием фибр в диапазоне $\mu_{fv} = 1\text{--}2\%$, коэффициентами продольного армирования – в диапазоне $\mu_s = 0,53\text{--}4,99\%$.

Конечно-элементные расчеты **двутавровых балок** по предложенной методике включали моделирование балок из обычного тяжелого и сверхвысокопрочного бетона со стальным и композитным поперечным армированием (в т. ч. при двухстадийных нагружениях с изменением пролета среза). Расчетную модель (рисунок 8) вводят в OpenSees в виде кода на языке программирования TCL.

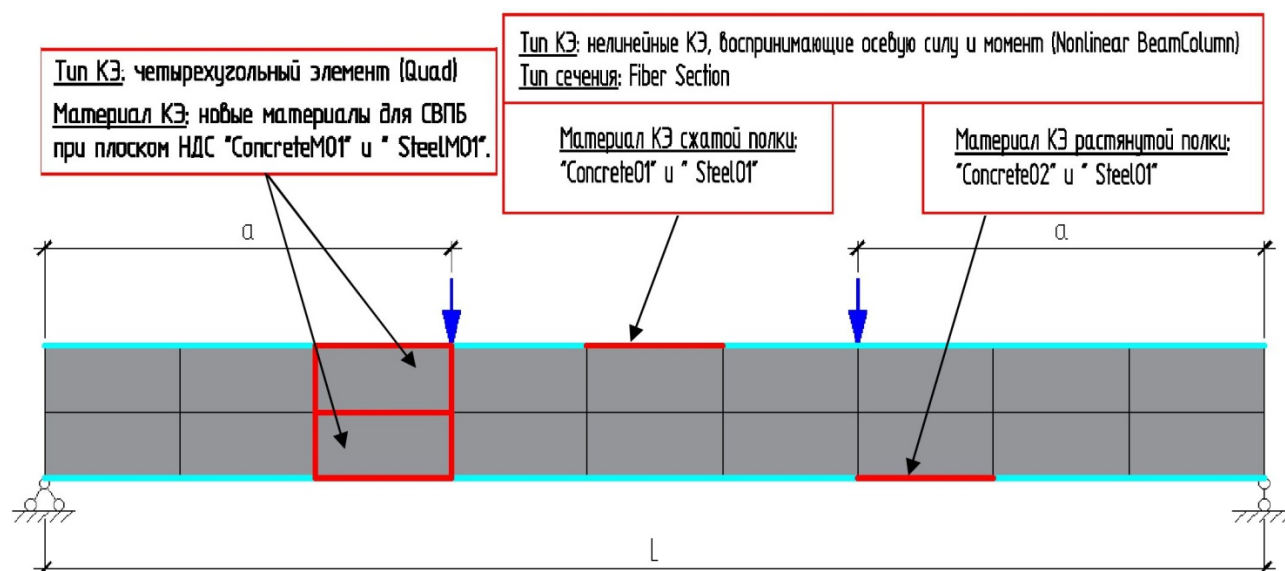


Рисунок 8 – Расчетная КЭ-модель в OpenSees

Стенки балок моделировали четырехугольными КЭ из расчетного железобетона FAREinforcedConcretePlaneStress, реализующего модель CSMM. Элементам стенок СВПБ-балок присвоены новые расчетные материалы ConcreteM01 и SteelM01.

Калибровка КЭ-моделей в OpenSees выполнена с использованием результатов испытаний из наших экспериментальных исследований и опытов других авторов. В результате калибровки уточняли густоту конечно-элементной сетки стенок балок и величину инкремента нагрузки.

Формирование **ИНС и регрессионных зависимостей** для расчета прочности наклонных сечений и стенок по наклонным бетонным полосам осуществляли по выборкам, составленным по нашим экспериментальным данным и опытам других авторов. Выборка по прочности стенок состоит из результатов 44 испытаний – в 5,5 раз больше числа переменных (фактор-аргументов), что является достаточ-

ным для обеспечения статистической значимости. Выборки для ИНС и регрессионных зависимостей прочности наклонных сечений СВПБ-балок еще более представительные и включают в общей сложности результаты 343 испытаний.

В пятой главе «Анализ результатов экспериментальных и численных исследований работы изгибаемых конструкций из высокопрочных и сверхвысокопрочных материалов» представлены и проанализированы результаты испытаний образцов СВПБ и АКП, балок по прочности, прогибам, образованию и раскрытию трещин, расчетов по разработанным методам с применением цифровых инструментов, сопоставления теоретических и экспериментальных данных по параметрам НДС конструкций.

Принятая схема *подбора состава СВПБ* позволила получить бетоны с прочностью на сжатие более 150 МПа. Введение в бетон фибр в зависимости от их концентрации и формы повысило прочность на растяжение в 1,3–2,6 раза – до 14 МПа. Значимое увеличение прочности на сжатие – до 18% – получено только при добавлении волновых фибр.

Испытания *специальных призматических образцов* имитировали работу композитных хомутов при их вертикальном или наклонном расположении. Все образцы разрушились вследствие разрыва стержней по искусственной трещине без признаков проскальзывания и выкалывания бетона вокруг стержня.

Для зависимости разрушающей растягивающей силы N_{ult} от наклона трещины для вертикального и наклонного армирования наблюдаются противоположные тенденции (рисунок 9). В первом случае разрушающее усилие во всем диапазоне снижается (до 30%), во втором – возрастает (до 33%). С ростом пролета среза угол наклона косой трещины имеет тенденцию к уменьшению. Поэтому полученные результаты указывают на большую эффективность наклонного армирования для наиболее часто встречающихся случаев средних (до $2h_0$) и больших (свыше $2h_0$) пролетов среза.

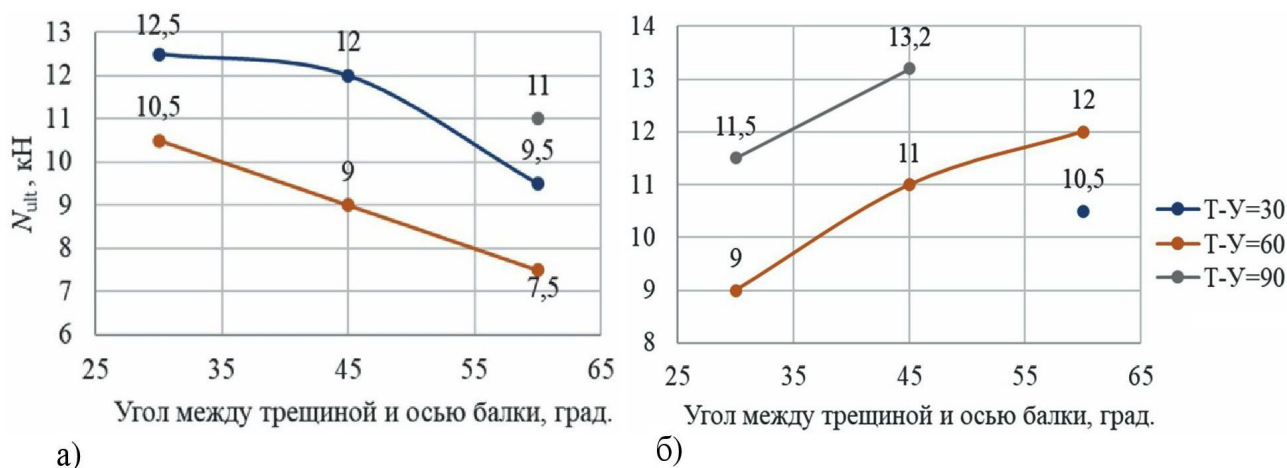


Рисунок 9 – Зависимость разрушающего усилия от угла между трещиной и осью балки для вертикального (а) и наклонного (б) армирования

Расчетное НДС стержней оценивали по максимальным главным напряжениям σ_{max} в КЭ-моделях (рисунок 10). Ко всем образцам в расчетах прикла-

дывали одинаковое растягивающее усилие 1 кН. На диаграмме на рисунке 11, построенной с разделением по цвету в соответствии с углами наклона поперечной арматуры в балках (45° и 90°), видна обратная зависимость между σ_{max} и опытными разрушающими усилиями N_{ult} , т. е. прочность снижается с увеличением главных напряжений, полученных моделированием. Построенные по точкам экспоненциальные тренды близки к линейным. Очевидно, что в верхней части диаграммы располагаются точки, соответствующие наклонному расположению арматуры. Тем самым, при близких уровнях главных напряжений несущая способность наклонной поперечной арматуры оказывается более высокой, чем вертикальной.

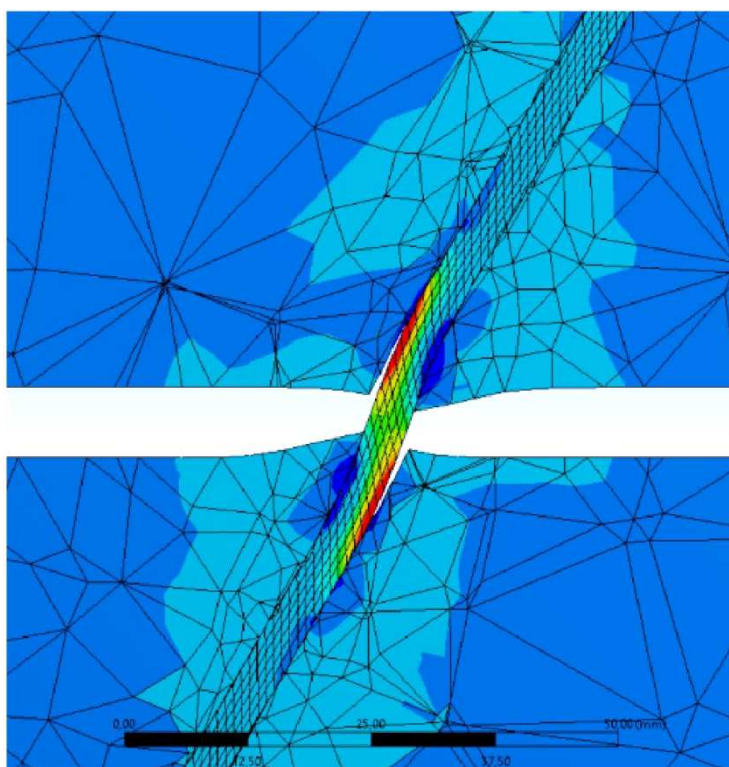


Рисунок 10 – Результаты расчета σ_{max} для В-30-90

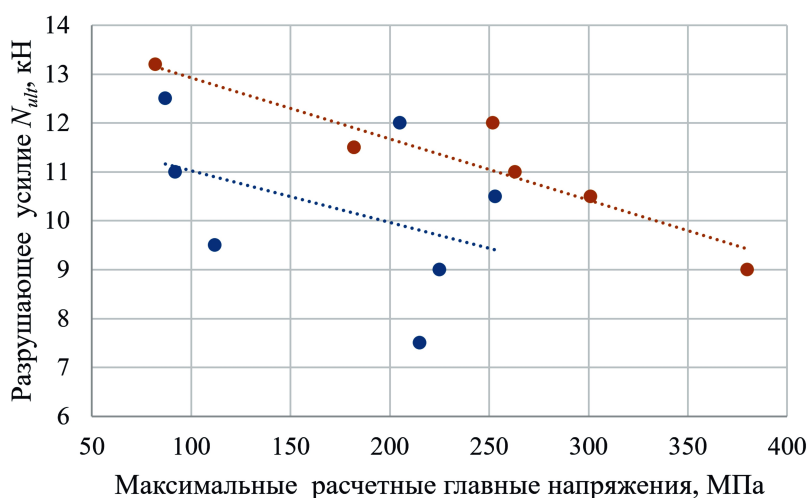


Рисунок 11 – Зависимость между σ_{max} и N_{ult}

Экспериментальные исследования **СВПБ-балок при действии изгибающего момента** показали, что на поздних этапах нагружения одна из трещин раскрывается интенсивнее – происходит локализация деформаций растянутой зоны, вызванная началом прогрессирующего выдергивания фибр в одном сечении (рисунок 12).

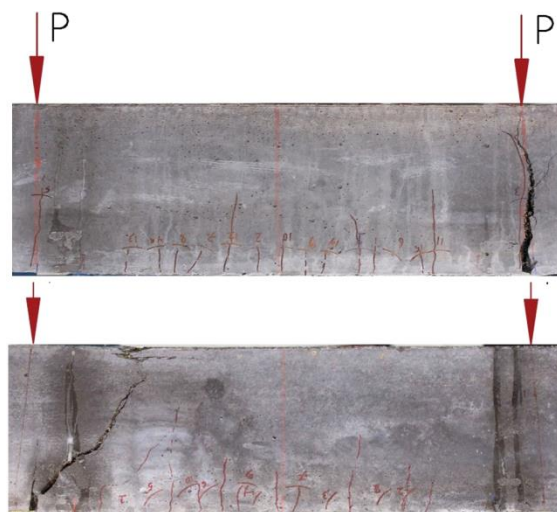


Рисунок 12 – Локализованные трещины

При $\mu_s = 2,56\%$ сопротивление балок после локализации продолжало расти (рисунок 13). При $\mu_s = 0,87\%$ рост сопротивления на этой стадии был мало-заметным. При $\mu_s = 0,31\%$ сразу за локализацией трещин шло падение сопротивления, характеризующее ниспадающей ветвью прогибов. Таким образом, для балок с $\mu_s = 0,31$ и $0,87\%$ нагрузка локализации трещин являлась разрушающей. В этих балках растягивающая сила, воспринимаемая СВПБ, оказывается больше силы, которую может воспринять арматура в стадии самоупрочнения. В балках же с $\mu_s = 2,56\%$ после локализации трещин усилия в арматуре в стадии самоупрочнения компенсируют упавшее сопротивление фибр.

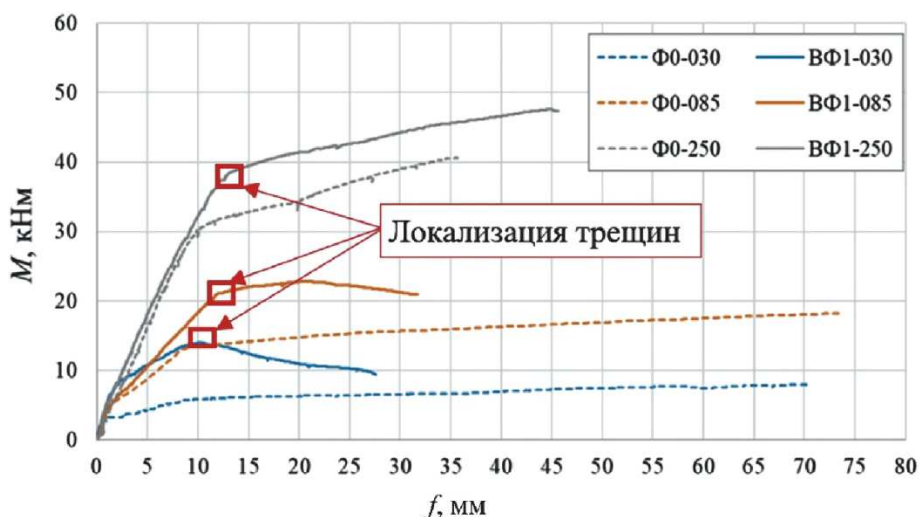


Рисунок 13 – Графики роста прогибов балок

Исключение разрушения балок вслед за локализацией трещин может быть достигнуто введением минимального коэффициента продольного армирования.

Примем $F_s = (\sigma_s - \sigma_m) \cdot A_s$ и $F_c = k \cdot A_c \cdot R_{fbt}$, где σ_s и σ_m – временное сопротивление разрыву и предел текучести арматуры; k – интегральный коэффициент, учитывающий отличие НДС растянутого бетона в нормальном сечении от работы при осевом растяжении. Для выборки по нашим и другим испытаниям СВПБ-балок построен график (рисунок 14), по одной оси которого отложена величина $F_c / k = A_c \cdot R_{fbt}$, а по второй – F_s . На графике проведена линия $F_s = 0,221(F_c / k)$, достаточно определенно разделяющая области с формами работы балок в постлокализационной стадии. Исходя из этого, после нескольких преобразований записано условие, при соблюдении которого будет обеспечена работа СВПБ-балок на стадии пластического деформирования арматуры $\mu_{s,min} \geq \frac{0,221hR_{fbt}}{(\sigma_s - \sigma_m) \cdot h_0}$.

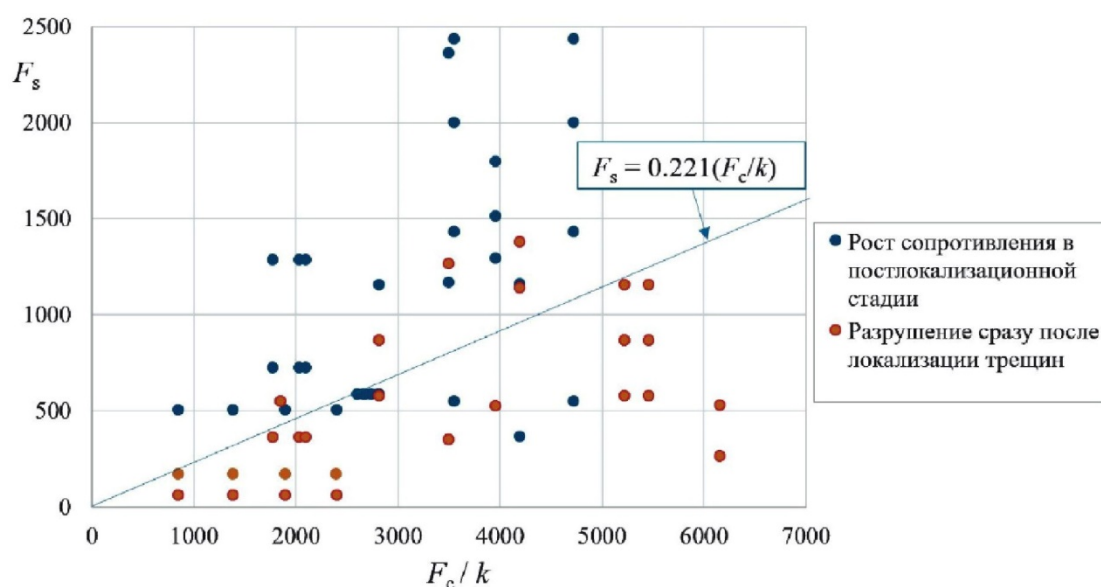


Рисунок 14 – Формы разрушения СВПБ-балок при разных значениях F_c / k и F_s

Рассмотрены результаты расчета СВПБ-балок по предложенной методике *КЭ-расчетов в ПК ABAQUS*. Близкое совпадение диаграмм крайних относительных деформаций, полученных расчетом и опытом, доказывает способность модели достоверно отражать характер поведения нормальных сечений (рисунок 15).

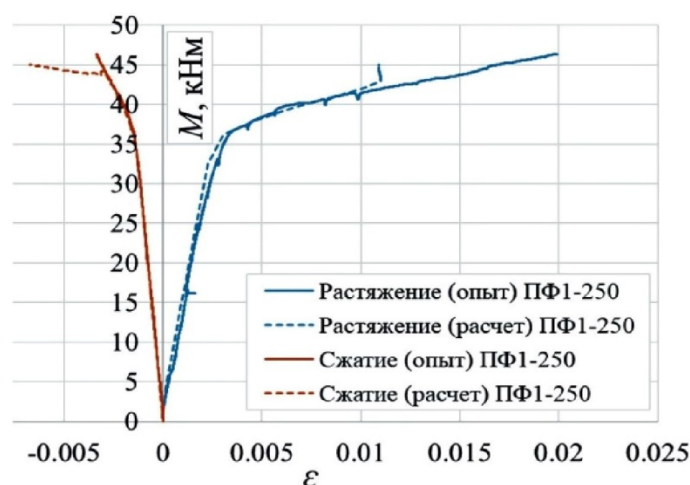


Рисунок 15 – Пример графиков роста крайних деформаций

Расчетные кривые зависимости прогибов балок от нагрузки во всех случаях также близки к опытным (рисунок 16).

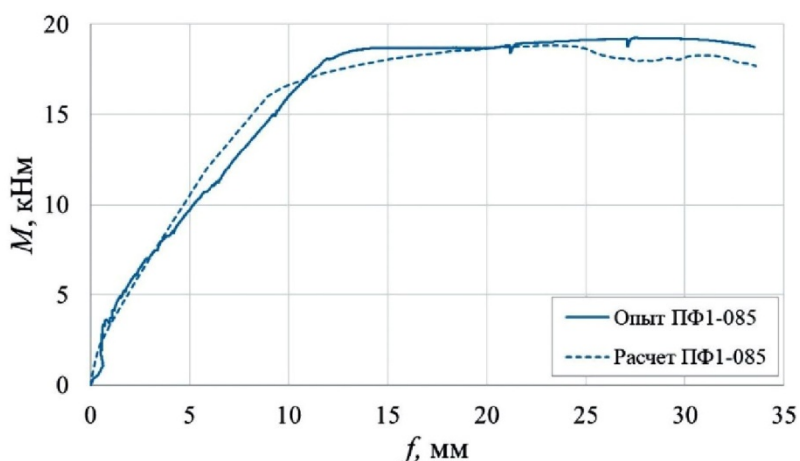


Рисунок 16 – Пример графиков прогибов балок

На рисунке 17 расчетная картина трещин (изополя значений параметра $d_t = 1 - \sigma_{bt}/\sigma_{bt0}$) в предельной стадии приведена с соответствующей фотографией балки. Диаграмма деформирования СВПБ при растяжении не дает дискретной картины трещин на изополях d_t и продольных деформаций ε_{11} . Однако настройка фильтра последних с выделением участков балок с $\varepsilon_{11} > \varepsilon_{btpk}$ позволяет визуализировать зоны трещинообразования (красная зона на рисунке 17, б). Более того, при настройке фильтра с подсветкой зон $\varepsilon_{11} > \varepsilon_{max}$, что соответствует полному разрушению растянутого СВПБ, выделяются участки, которые можно интерпретировать как локализованные нормальные трещины (серые зоны на рисунке 17, б).

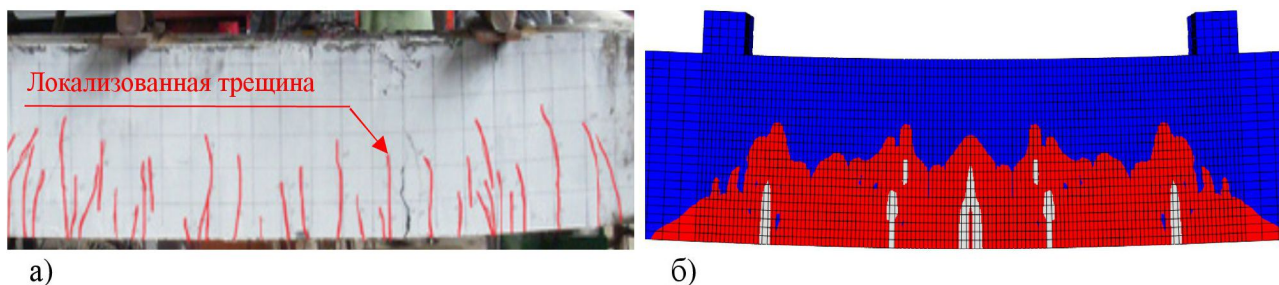


Рисунок 17 – Картина трещин (а) и соответствующие изополя деформаций ε_{11} (б)

По результатам экспериментальных исследований **сопротивления тонких стенок двутавровых балок** определены особенности развития наклонных трещин и влияние на прочность по наклонным бетонным полосам двухстадийных загрузжений с разными пролетами среза, доказана возможность армирования стенок балок композитной арматурой как альтернативы стальному армированию в широком диапазоне варьирования пролета среза, коэффициента и угла наклона поперечного армирования. Испытания показали, что предварительные трещины приводят к снижению прочности стенки опытных балок по сравнению с эталонными – около 5%, иногда – до 10%. При прочих идентичных параметрах прочность стенки образцов со стальной поперечной арматурой выше, чем с

композитными стержнями до 30–35%. Несмотря на повышенную деформативность АКП, сопротивление двутавровых балок с поперечным композитным армированием раскрытию наклонных трещин является удовлетворительным.

Разработанная методика *КЭ-расчетов в OpenSees* позволяет достаточно точно установить величину и распределение главных деформаций укорочения бетона в стенках двутавровых балок (рисунок 18). Расчетные графики «нагрузка-прогиб» в большинстве случаев близко ложатся к опытным, как и значения предельных прогибов (рисунок 19).

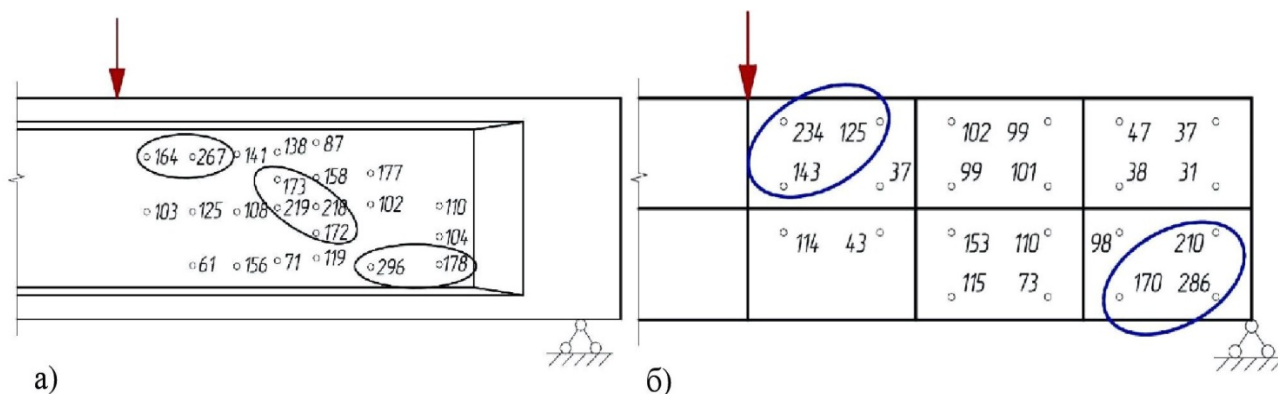


Рисунок 18 – Опытные (а) и расчетные (б) предельные деформации сжатия бетона

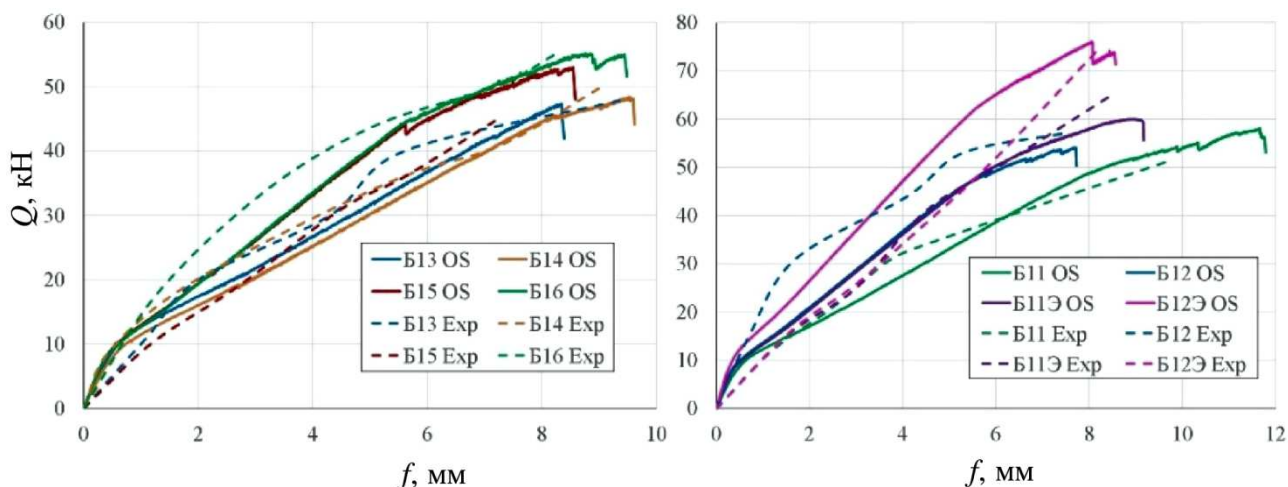


Рисунок 19 – Примеры совмещения опытных и расчетных графиков прогибов балок из обычного бетона с композитным и стальным поперечным армированием

Общее количество рассмотренных фактор-аргументов в *нейросетевых расчетах* прочности стенок – 7: пролет среза a/h_0 (x_1), угол наклона поперечной арматуры α (x_2), b (x_3), h_0 (x_4), R_b (x_5), μ_{sw} (x_6) и модуль упругости поперечной арматуры E (x_7).

Полученный набор ИНС с различными параметрами для нормализованной выборки показан на рисунке 20. Выбранная ИНС (MLP 7-12-1, выделена зеленой рамкой) включает 12 нейронов в промежуточном слое. Функцией активации для скрытого слоя является экспонента, для выходного слоя – синусоида.

Net. name	Training perf.	Test perf.	Validation perf.	Training error	Test error	Validation error	Training algorithm	Error function	Hidden activation	Output activation
MLP 7-16-1	0,998099	0,877666	0,997313	0,002515	0,001357	0,001338	BFGS 19	SOS	Logistic	Identity
MLP 7-7-1	0,997687	0,837459	0,999344	0,002878	0,000353	0,001960	BFGS 25	SOS	Logistic	Logistic
MLP 7-18-1	0,998482	0,636309	0,998872	0,002084	0,000640	0,024125	BFGS 29	SOS	Identity	Logistic
MLP 7-10-1	0,999616	0,966851	0,999508	0,000466	0,000832	0,000576	BFGS 37	SOS	Exponential	Sine
MLP 7-13-1	0,999333	0,929765	0,999736	0,000834	0,000249	0,000750	BFGS 77	SOS	Logistic	Logistic
MLP 7-13-1	0,999627	0,958458	0,999467	0,000452	0,000089	0,008127	BFGS 24	SOS	Exponential	Sine
MLP 7-10-1	0,999305	0,920996	0,999906	0,000959	0,000306	0,002465	BFGS 53	SOS	Tanh	Logistic
MLP 7-19-1	0,998468	0,869019	0,997582	0,001860	0,000471	0,001240	BFGS 19	SOS	Logistic	Sine
MLP 7-12-1	0,999429	0,991412	0,999352	0,000696	0,000306	0,000791	BFGS 37	SOS	Exponential	Sine
MLP 7-13-1	0,998236	0,945701	0,999586	0,002140	0,000130	0,039949	BFGS 18	SOS	Identity	Exponential

Рисунок 20 – Характеристики полученных ИНС для прочности стенок

Основным критерием отбора служила наименьшая ошибка сети на контрольной партии. Вместе с этим учитывали ошибки сети на тестовой и обучающей партиях и качество или долю правильно классифицированных наблюдений для каждой партии.

Анализ общей чувствительности к входным переменным ИНС (рисунок 21) показал, что параметрами, оказывающими наибольшее влияние на данные выходного слоя, являются h_0 (x_4) и R_b (x_5). Эти величины приняты в качестве независимых переменных (фактор-аргументов) для регрессии.

h_0	R_b	b	E	α	a/h_0	μ_{sw}
239,2786	27,78572	24,09296	9,019829	2,844891	2,326396	1,606710

Рисунок 21 – Результаты анализа общей чувствительности ИНС

Для обеих независимых переменных парные коэффициенты корреляции являются значимыми (по шкале Чеддока переменная x_4 имеет высокую связь с зависимой переменной, x_5 – умеренную). Мультиколлинеарность практически отсутствует, так как парный коэффициент корреляции равен 0,197, что не выше допустимого значения 0,7 (рисунок 22).

Correlations (77 бапок) Marked correlations are significant at $p < ,05000$ N=77 (Casewise deletion of missing data)					
Variable	Means	Std.Dev.	Q_{ult}	h_0	R_b
Q_{ult}	0,000000	1,000000	1,000000	0,723520	0,447918
h_0	0,000000	1,000000	0,723520	1,000000	0,197461
R_b	-0,000000	1,000000	0,447918	0,197461	1,000000

Рисунок 22 – Корреляционная матрица

Из визуального анализа тернарного графика (рисунок 23) следует, что выбросы и незначимые данные отсутствуют. Исходя из формы полученной поверхности принято решение использовать как наиболее подходящую для последующего преобразования в формулу для инженерных расчетов степенную функцию общего вида:

$$y = ax_1^{m_1}x_2^{m_2}x_3^{m_3}x_4^{m_4}x_5^{m_5}x_6^{m_6}x_7^{m_7}, \quad (1)$$

где a – общий коэффициент регрессии; m_1-m_7 – степени независимых переменных.

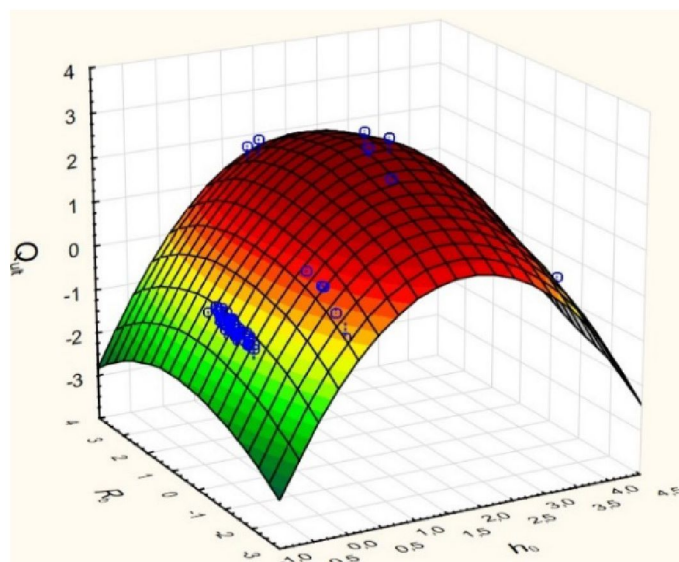


Рисунок 23 – Тернарный график

Искомые величины подбирали, используя модуль Nonlinear Estimation. В качестве метода вычисления параметров a и m_i принят алгоритм Левенберга-Марквардта. После расчета параметров уравнение приняло вид:

$$y = 4215,9x_1^{-0,353}x_2^{-0,612}x_3^{1,072}x_4^{1,124}x_5^{0,512}x_6^{-0,019}x_7^{0,481}. \quad (2)$$

Остатки на нормальном вероятностном графике (рисунок 24) достаточно хорошо ложатся на прямую, соответствующую нормальному закону, что говорит об адекватности исследуемой зависимости. Результаты анализа с помощью ANOVA (рисунок 25) показали, что F -критерий значим на уровне 0,05, а значения множественных коэффициентов корреляции и детерминации регрессии равны 0,996 и 0,998. Это отражает наличие тесной связи между фактор-аргументами и зависимой переменной.

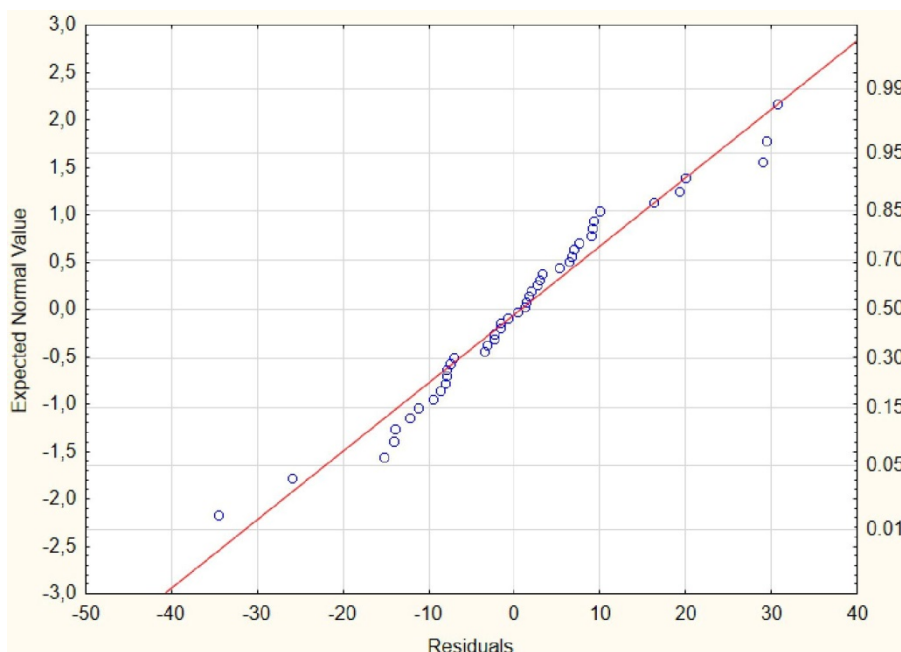


Рисунок 24 – График остатков регрессии

Model is: $v8=a0*v1^b1*v2^b2*v3^b3*v4^b4*v5^b5*v6^b6*v7^b7$ Dep. Var. : Q, kN					
Effect	1 Sum of Squares	2 DF	3 Mean Squares	4 F-value	5 p-value
Regression	2797336	8,00000	349667,0	1665,470	0,000000
Residual	7558	36,00000	210,0		
Total	2804894	44,00000			
Corrected Total	1914921	43,00000			
Regression vs. Corrected Total	2797336	8,00000	349667,0	7,852	0,000002

Рисунок 25 – Оценка регрессии с помощью ANOVA

После оптимизации формулы, упрощающей ее применение для инженерных расчетов, получен следующий ее вид

$$Q = 4200 \frac{b^{1,1} h_0^{1,5} \sqrt{R_b E}}{\alpha^{0,4} \alpha^{0,6} \mu_{sw(fw)}^{0,1}}. \quad (3)$$

Влияние предыстории нагружения на прочность стенки можно учесть в упрощенном виде понижающим коэффициентом условий работы γ_h к расчетной несущей способности балки без начальных трещин в стенке. Значения γ_h , вычисленные статистическим анализом, составили 0,9 и 0,85 соответственно при вертикальном и наклонном расположении поперечной арматуры.

Предложенная формула (3) компактна, подходит для расчетов прочности стенок балок со стальной и композитной поперечной арматурой и дает близкую сходимость теоретических и опытных результатов.

Представлены экспериментальные данные по **прочности наклонных сечений двутавровых СВПБ-балок** и результаты их расчетной оценки по предложенной методологии с применением цифровых инструментов. При одинаковом уровне нагрузки ширина раскрытия наклонных трещин у балок из сверхвысокопрочного бетона с фибрами в 2–2,5 раза меньше, чем у балок без фибр. Фибровое армирование в балках без поперечной арматуры позволяет им сохранять несущую способность при нагрузках, значительно превосходящих нагрузки образования первых трещин. На диаграммах на рисунке 26 сгруппированы разрушающие нагрузки для балок-близнецов, отличающихся стержневым и фибровым армированием. Приросты несущей способности, возникающие при одинаковом увеличении интенсивности армирования, достаточно близки друг к другу, несмотря на различия в остальных параметрах.

Разница между разрушающими поперечными силами Q_{ult} при относительных пролетах среза 3 и 2 для образцов с фибровым и стержневым армированием составляет до 19%, для балок без армирования стенки – около 55%. Уменьшение ширины сжатой полки балок с 20 до 5 см привело к снижению Q_{ult} на 14%.

На СВПБ-балках апробирована представленная *методика КЭ-расчетов в OpenSees*. Для калибровки модели были использованы результаты испытаний других исследователей. Рассмотренная выборка образцов охватывала широкие диапазоны прочности бетона, коэффициентов стержневого и фибрового поперечного армирования. Примеры диаграмм деформирования, построенных для испытанных нами балок по откалиброванной модели, показаны на рисунке 27.

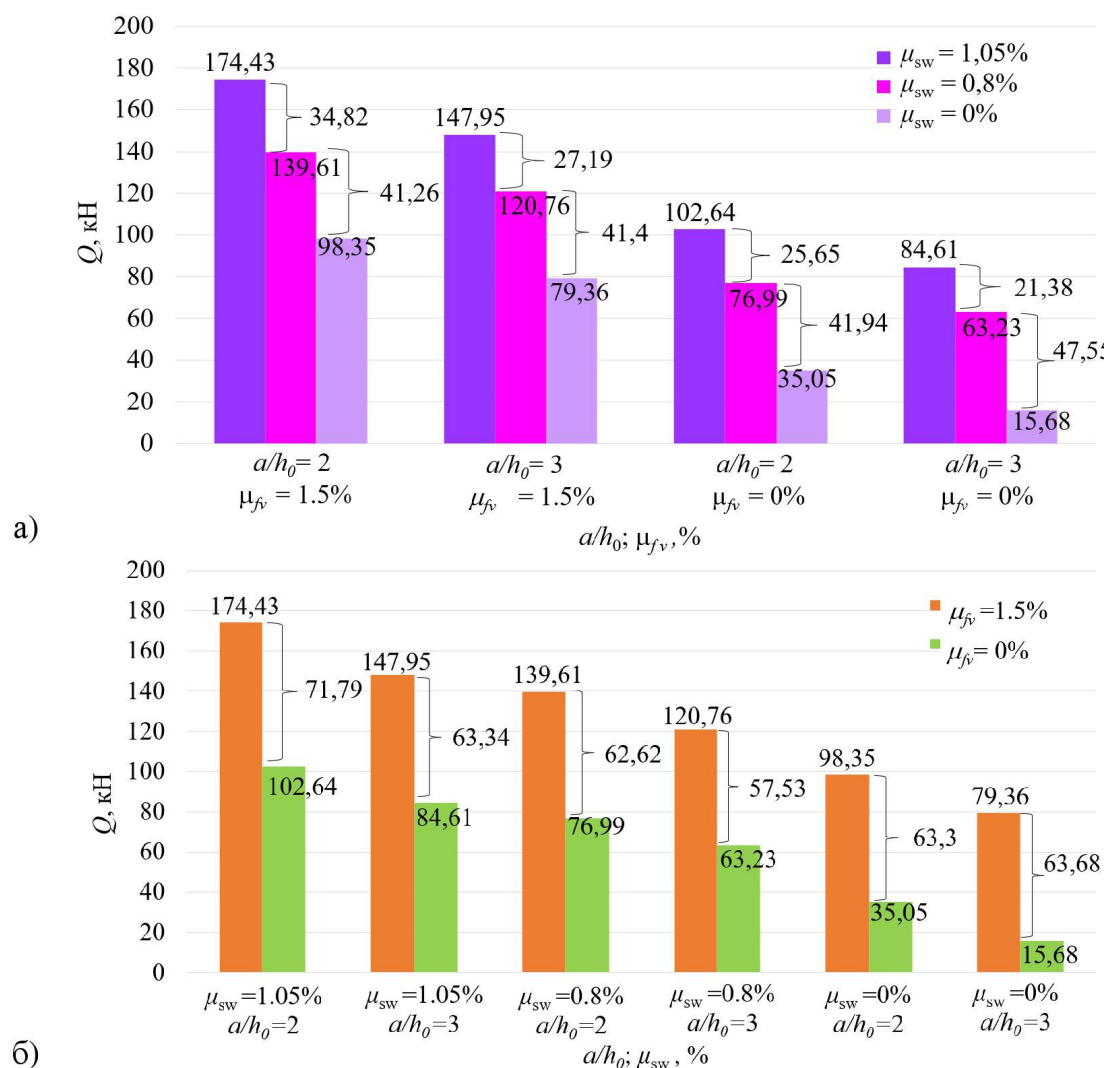
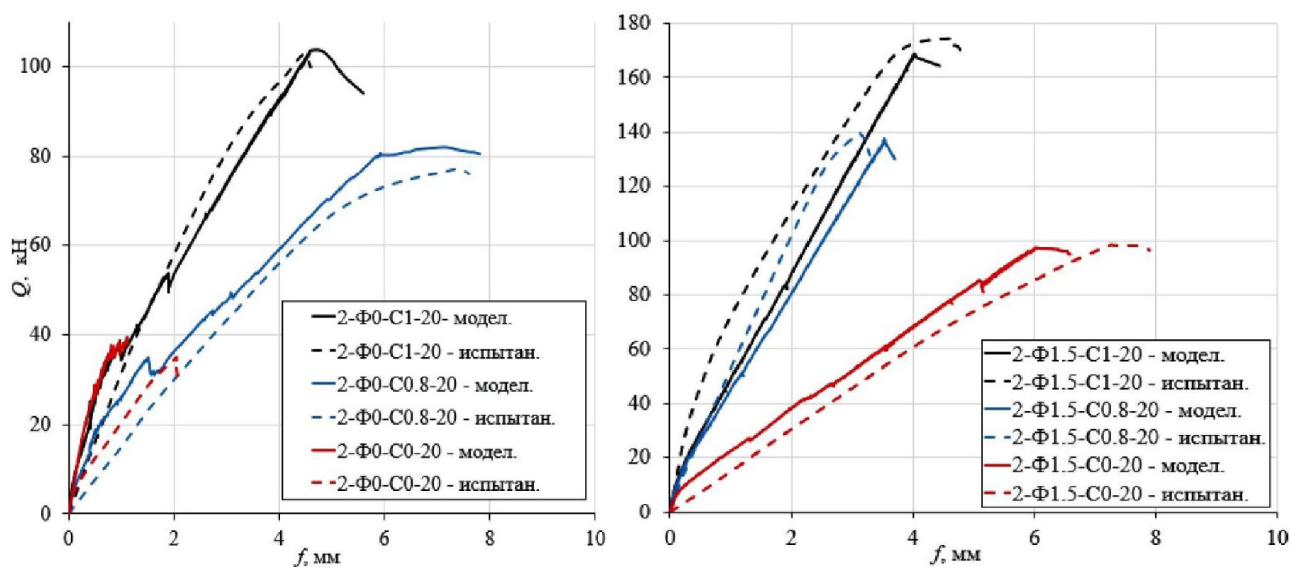


Рисунок 26 – Разница в разрушающих поперечных силах для балок-близнецов, отличающихся μ_{sw} (а) и μ_{fv} (б)



В части зависимости прогибов от нагрузки наилучшими оказались расчеты балок с поперечной арматурой без фибрового армирования. Наименее удачные результаты получены для балок, не имевших ни стержневого, ни фибрового армирования. Это можно объяснить тем, что модель CSMM была получена на основе испытаний армированных бетонных мембранных элементов. Кроме того, сами опытные данные по балкам без поперечной арматуры обладают существенным разбросом, особенно при малых и средних пролетах среза.

При прогнозировании прочности наклонных сечений двутавровых СВПБ-балок *нейронными сетями* по предложенной методике в программе была задана процедура отбора десяти сетей из ста с лучшими показателями обучения и тестирования в вычисленном диапазоне количества нейронов промежуточного слоя и разными функциями активации. На графиках изменения ошибки сети в ходе обучения, где отображаются значения среднеквадратичной ошибки выхода на всем обучающем множестве, ни у одной из полученных ИНС признаков переобучения не наблюдалось. Из полученных нейронных сетей для последующего сравнительного анализа качества работы оставлены четыре с наибольшими показателями производительности (таблица 2). Анализ чувствительности показал, что принятая в начале исследования предпосылка о необходимости учета всех шести параметров – μ_s , A_f/A_w , h_0 , a/h_0 , b_w , R_{bt} – является верной. Последующий отбор осуществляли сравнением по индексу множественной корреляции $R = \sqrt{1 - \frac{s^2}{s_y^2}}$, метрикам

$$MAPE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{|y_{\text{факт}} - y_{\text{прогн}}|}{|y_{\text{факт}}|} \cdot 100\% \text{ и } RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_{\text{факт}} - y_{\text{прогн}})^2}.$$

Таблица 2 – Показатели качества ИНС

№	Арх-ра	Произв-ть сети на обучаю- щем мно- жестве	Произв-ть сети на тестовом множе- стве	Проме- жут. функция актива- ции	Функция актива- ции вы- ходного нейрона	Алгоритм обучения	MAPE, %	RMSE, кН	R
10	MLP 6-5-1	0,9915	0,9610	Logistic	Tanh	BFGS 214	7,92	32,66	0,986
58	MLP 6-11-1	0,9960	0,9779	Tanh	Expon.	BFGS 206	8,65	24,8	0,992
72	MLP 6-11-1	0,9943	0,9697	Tanh	Expon.	BFGS 123	9,1	30,58	0,988
96	MLP 6-8-1	0,9969	0,9779	Tanh	Expon.	BFGS 157	5,8	25,12	0,992

Метрика RMSE имеет наименьшую величину у нейронной сети № 58 – 24,8 кН. Однако при этом у сети № 96, выделенной по показателю MAPE, ошибка RMSE составила 25,12 кН – всего лишь на 1,3% выше указанного минимального значения. Исходя из этого, из четырех смоделированных нейронных сетей как наиболее точную можно рекомендовать сеть № 96 – MLP 6-8-1.

По принятому алгоритму построены *регрессионные зависимости* для инженерных расчетов двутавровых СВПБ-балок на действие поперечных сил. На первом этапе осуществлен выбор функциональной формы для Q_b визуальным анализом, полезным при первичной оценке данных и выявлении общих зако-

номерностей. Из рассмотрения трехмерных поверхностей (рисунок 28) следует, что уравнение зависимости переменной y от x_1 , x_2 , x_3 и x_4 должно иметь сложную нелинейную форму.

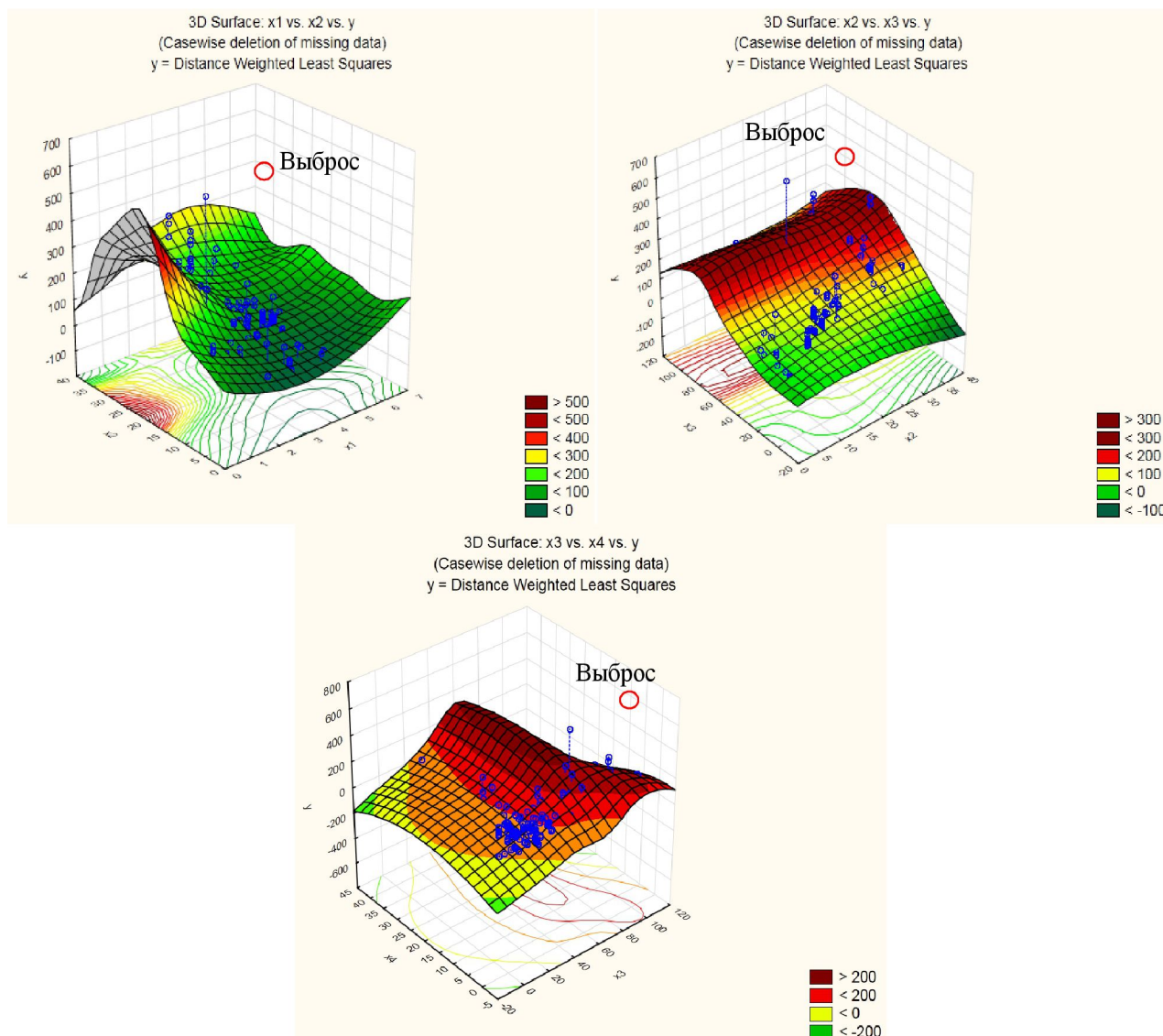


Рисунок 28 – Трехмерные графики (поверхности) зависимости y от x_1 , x_2 , x_3 и x_4

Для визуализации описательных статистик экспериментальных данных построены т.н. «ящичковые» диаграммы (рисунок 29), с помощью которых данные можно оценить на предмет структуры распределения, наличия выбросов, однородности наблюдений и т. д. Как видно, переменные x_1 , x_5 и x_6 тесно расположены около своего среднего значения. Переменные x_2 , x_3 , x_4 и y имеют симметричное распределение. Переменная y имеет наибольший разброс.

Мультиколлинеарность входящих в зависимости переменных исключена рассмотрением матриц парных коэффициентов корреляции и анализом входных переменных при построении модели ИНС.

Оценку параметров модели Q_b осуществляли с помощью метода наименьших квадратов (МНК), требующего выполнения ряда статистических предпосылок.

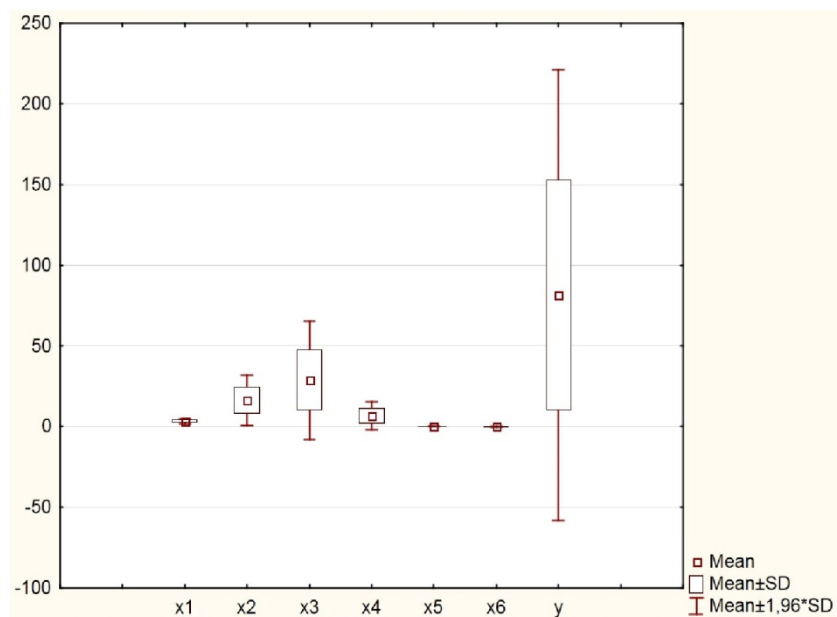


Рисунок 29 – «Ящичковые» диаграммы

Одним из ключевых условий является гомоскедастичность – постоянство дисперсии случайных ошибок модели. Нарушение этого условия приводит к некорректности применения t -критерия Стьюдента и F -критерия Фишера. В пакете STATISTICA использован графический анализ для выявления гетероскедастичности. На графике (рисунок 30), где по оси абсцисс отложены значения y , а по оси ординат – ее отклонения, остатки распределены случайным образом, без выраженного систематического изменения разброса. Это позволяет предположить отсутствие гетероскедастичности и использовать МНК для оценки параметров нелинейного уравнения регрессии.

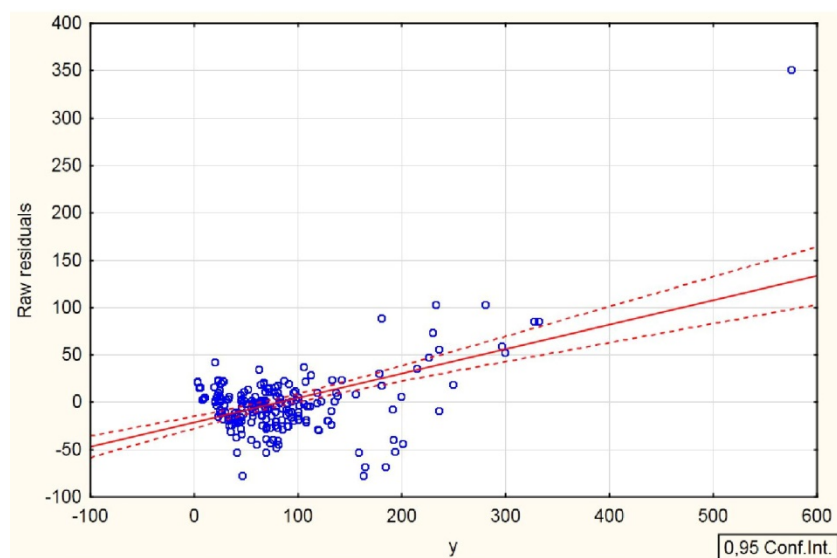


Рисунок 30 – График зависимости остатков от переменной y

За основу взята сложная нелинейная зависимость вида:

$$y = a_0 x_1^{m_1} x_2 x_3 x_4^{m_2} x_5^{m_3} (1 + a_1 x_6) \left(1 + a_2 \frac{1}{\sqrt{x_3}}\right). \quad (4)$$

Результаты работы по оценке параметров регрессии позволили записать аналитическое представление уравнения:

$$y = 1,466x_1^{-1,14}x_2x_3x_4^{0,2}x_5^{0,6}(1 + 1,6x_6)\left(1 + 9,4\frac{1}{\sqrt{x_3}}\right). \quad (5)$$

Рассчитанные величины t -статистики, p -значения и показателя множественной корреляции R подтвердили хороший подбор уравнений регрессии и статистическую значимость их параметров. Адекватность полученных зависимостей подтверждена анализом диаграмм распределения остатков и рассеяния (рисунок 31).

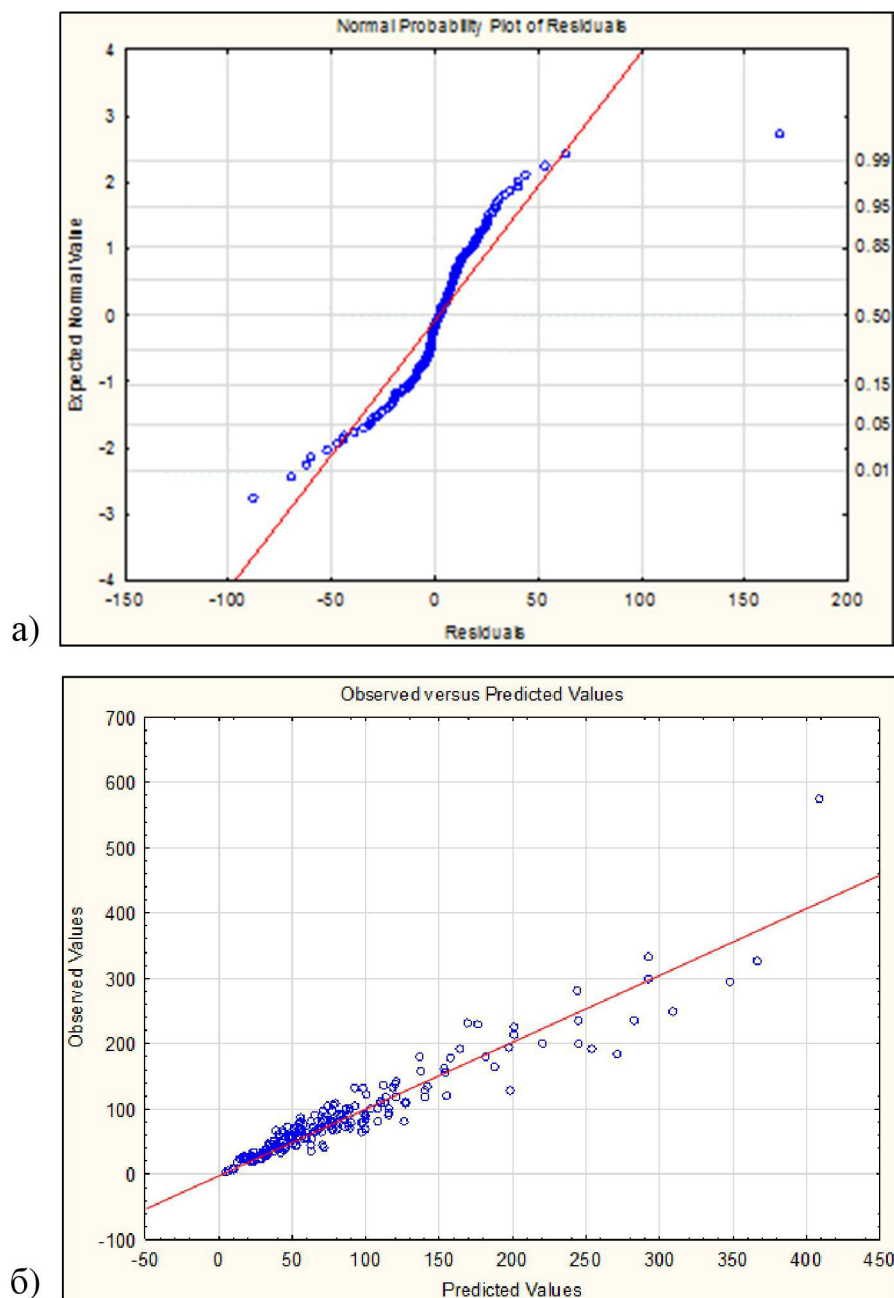


Рисунок 31 – Диаграммы распределения остатков (а) и рассеяния (б)

На втором этапе регрессионного анализа построена зависимость для сопротивления балок из сверхвысокопрочного бетона с фибровым армированием, не имеющих стержневой поперечной арматуры. Общий вид функции

$Q = Q_b + Q_f$. Подставив вместо Q_b величину y , рассчитываемую по (5), и заменив вклад фибр функцией от $x_1 (b_w)$, $x_2 (h_0)$, $x_3 (R_{bt})$, $x_4 (\mu_s)$, получим

$$Q = y + f(x_1, x_2, x_3, x_4). \quad (6)$$

По матрице на рисунке 32 видно, что аргументы x_2 и y имеют очень высокую парную корреляцию (больше 0,7). Близость к нулю определителя матрицы парных коэффициентов корреляции ($\det R = 0,014$) означает наличие мультиколлинеарности между аргументами. Для учета внутренней корреляции факторов перейдем к совмещенным уравнениям регрессии. Включим в зависимость совмещение наших фактор-аргументов $Q = y + f(x_1, x_2, x_3, x_4, x_1 \cdot x_2 \cdot x_3 \cdot x_4)$ в первой степени, и спецификация вновь будет представлять сложную нелинейную зависимость. Нелинейность взаимосвязи подтверждается формами построенных трехмерных поверхностей зависимости переменной Q от своих аргументов (рисунок 33).

Correlations (Spreadsheet1)								
Marked correlations are significant at p < ,05000								
N=56 (Casewise deletion of missing data)								
Variable	Means	Std.Dev.	x1	x2	x3	x4	y	Q
x1	4,4821	0,9861	1,000000	0,031394	0,216939	-0,508297	0,166597	0,276947
x2	37,6357	18,9912	0,031394	1,000000	0,616026	-0,203521	0,831776	0,783928
x3	1,3526	0,5999	0,216939	0,616026	1,000000	-0,573725	0,597728	0,635939
x4	0,0394	0,0187	-0,508297	-0,203521	-0,573725	1,000000	-0,253158	-0,160484
y	98,9823	53,7237	0,166597	0,831776	0,597728	-0,253158	1,000000	0,834242
Q	279,6782	183,3429	0,276947	0,783928	0,635939	-0,160484	0,834242	1,000000

Рисунок 32 – Матрица парных коэффициентов корреляций и ее определитель

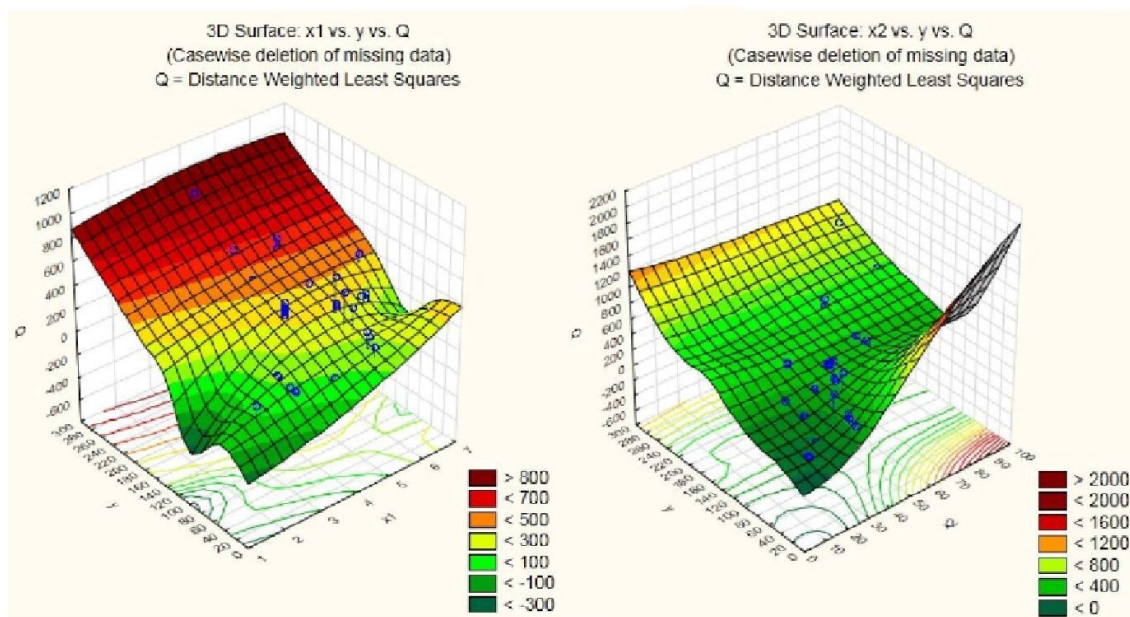


Рисунок 33 – Трехмерные графики (поверхности) зависимости Q от x_1 и x_2

Анализ чувствительности (рисунок 34) указывает на необходимость участия в регрессии всех переменных, при этом наибольший вклад ожидаемо будет вносить переменная y (вклад бетона Q_b).

y	x2	x4	x3	x1
106,7567	30,73866	8,477698	8,374472	2,453012

Рисунок 34 – Анализ чувствительности Q

В результате проведенных исследований было решено использовать в качестве спецификации модели зависимость

$$Q = y + a_0 x_1 x_2 x_3^{m_3} x_4^{m_4} \left(1 + 2 \frac{1}{\sqrt{x_2}}\right). \quad (7)$$

По результатам оценки параметров регрессии получим следующий общий вид уравнения:

$$Q = y + 5,46 x_1 x_2 x_3^{0,95} x_4^{0,65} \left(1 + 2 \frac{1}{\sqrt{x_2}}\right). \quad (8)$$

По значимости F -статистики признана статистическая значимость уравнения регрессии: связь между рассматриваемыми признаками есть, а результаты наблюдений не противоречат предположению о ее спецификации (рисунок 35). Нормальный вероятностный график (рисунок 36) подтверждает близость распределения остатков к нормальному.

Model is: $v_6 = v_5 + a_0 \cdot v_1 \cdot v_2 \cdot v_3^{m_3} \cdot v_4^{m_4} \cdot (1 + 2 \cdot v_2^{(-0,5)})$ (S _p) Dep. Var. : Q					
Effect	1 Sum of Squares	2 DF	3 Mean Squares	4 F-value	5 p-value
Regression	5907108	3,00000	1969036	324,0869	0,00
Residual	322009	53,00000	6076		
Total	6229117	56,00000			
Corrected Total	1848804	55,00000			
Regression vs. Corrected Total	5907108	3,00000	1969036	58,5768	0,00

Рисунок 35 – Результаты многомерного дисперсионного анализа

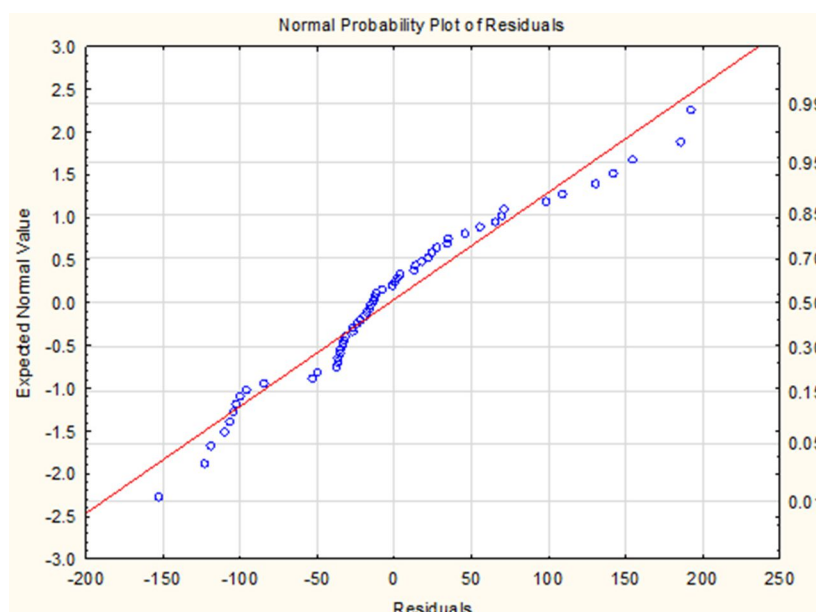


Рисунок 36 – Диаграммы распределения остатков

Наличие автокорреляции между аргументами мешает подтвердить правильность выбора спецификации, в этом случае необходимо провести сравнительный анализ между альтернативными вариантами регрессионной зависимости. В качестве альтернативы взято уравнение совместного влияния без учета фактора x_2

$$Q = a_0 x_1^{m_1} x_3^{m_3} x_4^{m_4} y, \quad (9)$$

рассчитаны его параметры.

В экспериментальных исследованиях работы **наклонных сечений с композитным армированием** две балки разрушились вследствие разрыва хомутов, в остальных разрушение наступало по сжатому бетону над вершиной наклонной трещины. Раскрытие наклонных трещин в балках с композитными хомутами перед разрушением не превышало 1 мм при 0,3–0,4 мм у аналогичных образцов со стальными хомутами. Полученная опытная величина раскрытия трещин 1 мм может считаться для АКП приемлемой с учетом ее стойкости к коррозии. Замена стальных хомутов диаметром 5 мм композитными диаметром 4 мм при сохранении их шага привела к снижению несущей способности балок в среднем на 16%, при наклонных хомутах – до 27%.

Конечно-элементные расчеты в ABAQUS по предложенной методике выполнены для всех испытанных нами балок, а также для балок других авторов. Полученные графики роста прогибов балок хорошо согласуются с экспериментальными на всех стадиях нагружения (пример на рисунке 37). По результатам расчетов разрушение балок, как и в опытах, наступило от раздробления бетона над вершиной наклонной трещины вблизи точки приложения нагрузки (рисунок 38).

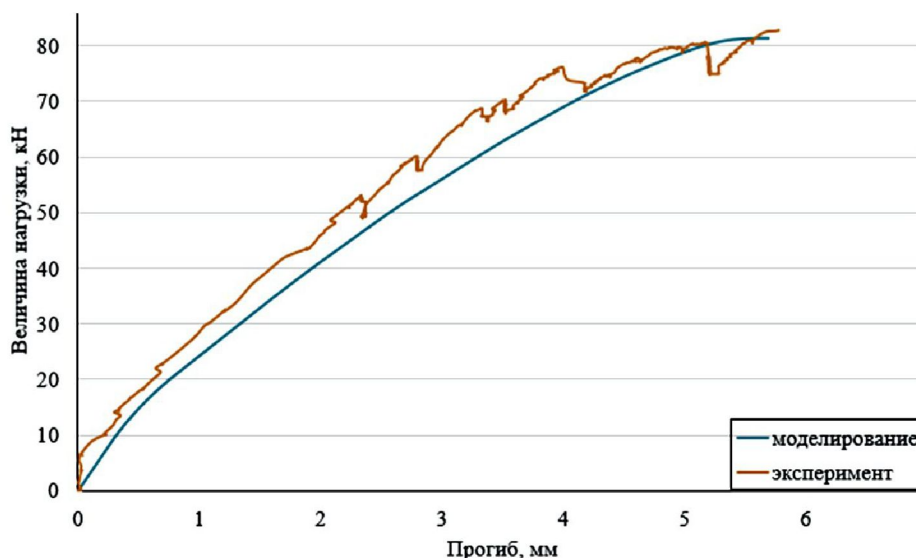


Рисунок 37 – Расчетные и опытные графики прогибов балки О6-В-В-100

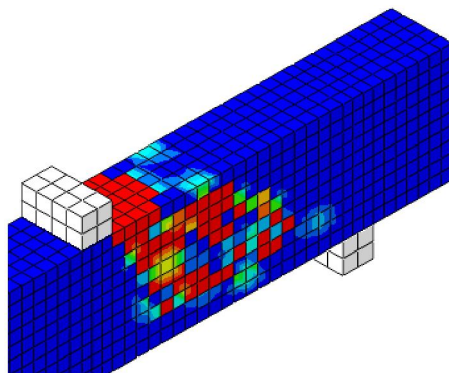


Рисунок 38 – Область разрушения бетона балки О2-В-К-100

При составлении КЭ-моделей балок для случаев с разрывом композитных стержней создавали искусственную наклонную трещину (разделение конечных элементов) с траекторией, аналогичной трещине при испытаниях (рисунок 39).

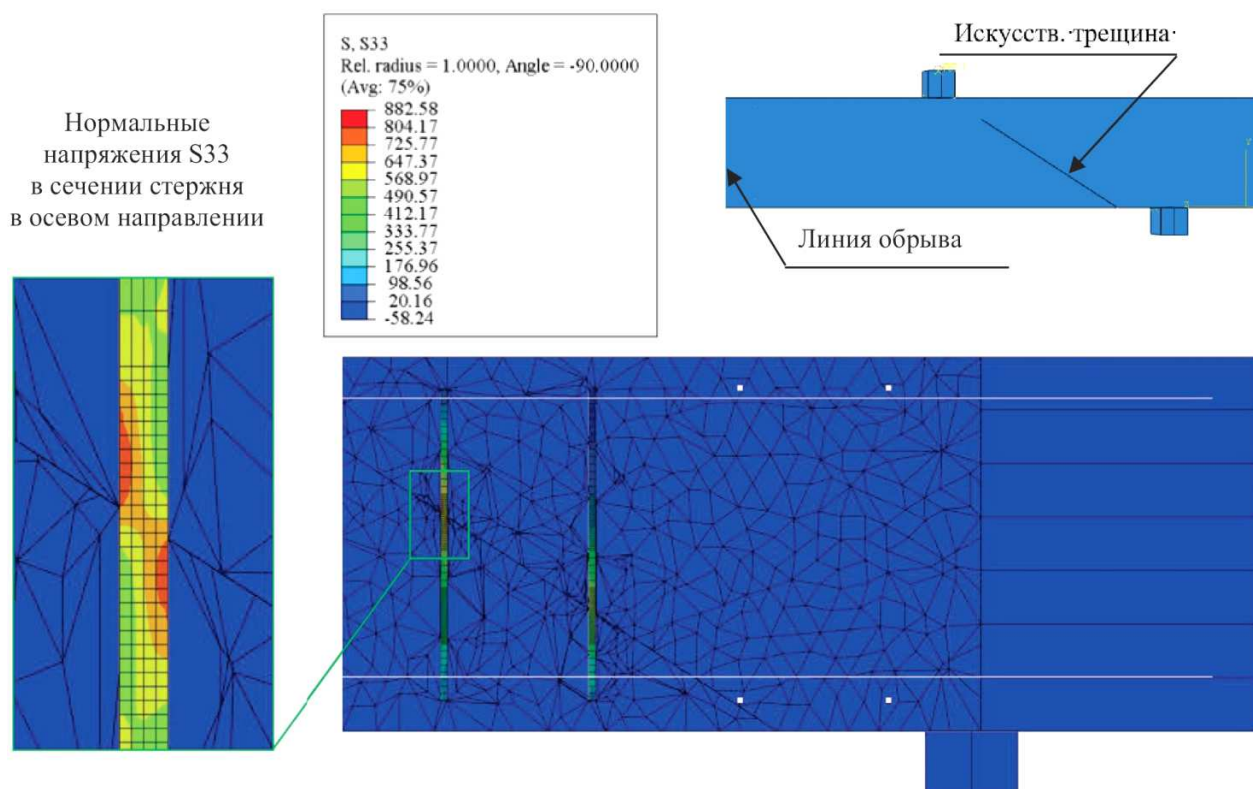


Рисунок 39 – Расчетные напряжения в хомутах балки O1-B-K-80

Оригинальность подхода заключается в моделировании стержней объемными элементами с анизотропными деформативными свойствами. Расчетное НДС, возникающее в хомутах, демонстрирует способность модели имитировать эффект изгиба стержня в месте пересечения с наклонной трещиной. Нормальные напряжения в поперечном сечении стержня распределены на этом участке неравномерно: разница между максимальными и средними нормальными напряжениями в стержнях составила около 25%.

Схожая картина получена при КЭ-расчетах испытанных нами специальных призматических образцов, соответствующих рассмотренным картинам разрушения балок (рисунок 40).

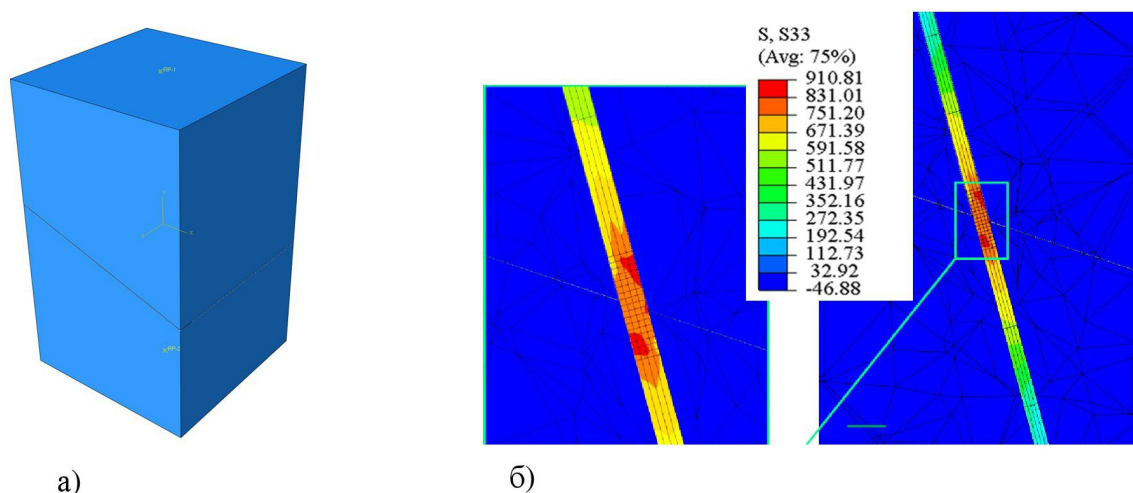


Рисунок 40 – Общий вид модели образца В-30-75 (а) и распределение напряжений в арматуре (б)

Из сопоставления опытных и численных результатов следует, что разрыв композитных хомутов происходит до достижения ими своего временного сопротивления при осевом растяжении в результате изгиба, снижающего их прочность на 13–17%. В целом, можно рекомендовать ограничение напряжений в хомутах при расчетах 80% от прочности АКП при осевом растяжении.

В шестой главе «Проверка и оценка точности разработанных подходов к расчету конструкций из высокопрочных и сверхвысокопрочных материалов на основе цифровых технологий» выполнено сравнение экспериментальных и теоретических результатов, сопоставлены точности предложенных и нормативных методов расчета.

Точность расчетов *прочности нормальных сечений СВПБ-балок* по разработанной методике КЭ-расчета оценивали сравнением с теоретическими результатами, полученными по формулам норм и руководств (СП 360.13330, FHWA-NIF-13-032, FIB Model Code). Погрешность по всем трем нормативным методикам находится в относительно узком диапазоне – от 15 до 18%. При применении разработанной методики КЭ-расчета расхождение между экспериментальными и расчетными данными уменьшается до 3,8 раза.

Наилучшая сходимость опытных Q_{exp} и расчетных Q_{calc} значений *прочности стенок* получена по нейросетевому прогнозированию: среднее значение отношения Q_{exp} / Q_{calc} составило 0,99, коэффициент его вариации – 4%. Для КЭ-расчетов в OpenSees среднее значение Q_{exp} / Q_{calc} совпадает с полученным с помощью ИНС, однако разброс значений здесь чуть больше. При этом они позволяют получать не только предельные значения нагрузок и прогибов, но и оценивать поведение конструкции на всех этапах ее работы. Регрессионные зависимости в сравнении с расчетами КЭ и ИНС показали меньшую точность результатов, но и здесь полученные расхождения Q_{exp} и Q_{calc} вполне удовлетворительны для расчетов. Достоинством регрессионного расчета является возможность его применения для конструкций с различными типами армирования.

Теоретические значения *прочности наклонных сечений СВПБ-балок* по предложенным методикам достаточно хорошо согласуются с опытными данными. Нейросетевое прогнозирование показало лучшие результаты при всех сочетаниях стержневого и фибрового армирования балок – максимальная погрешность по всем выборкам составила лишь 15%. Наибольшая точность регрессионных зависимостей достигается в отсутствие фибрового и поперечного стержневого армирования балок: средняя разница между опытными и теоретическими значениями в этом случае равна 17%. При расчете балок с фибрами и поперечной арматурой погрешность возрастает до 28%, при этом среднее значение отношения Q_{exp} / Q_{calc} равно 1,19, т.е. отклонение в сторону запаса. Применение предложенных подходов позволяет существенно повысить точность расчетов в сравнении с нормативными. Разница между опытными и теоретическими значениями при регрессионных расчетах снижается в 1,3–2,4 раза, при нейросетевых – в 2,5–9,4 раза. Каждая из разработанных методик без изменений может применяться как к расчету балок из сверхвысокопрочного бетона с неармированными наклонными сечениями, так и для балок с фибровым и/или поперечным стержневым армированием, в то время как нормативные методики для этих случаев различны.

Опытные значения прочности *наклонных сечений прямоугольных балок с композитными хомутами* сопоставлены с результатами по предложенной методике КЭ-расчетов в ABAQUS, а также по формулам СП 295.1325800. Среднее отношение опытной несущей способности к расчетной по нормативной методике для балок со стальными хомутами составило 0,98 при коэффициенте вариации 8,3%. При этом методика СП существенно переоценивает несущую способность балок с композитным поперечным армированием – отношение Q_{exp} / Q_{calc} для них составляет 0,57. Более точными получились вычисления по предложенной методике нелинейных КЭ-расчетов. Продемонстрирована хорошая сходимость опытных и расчетных прогибов балок. По прочности балок расчеты недооценивают опытные величины на 6%, что следует считать удовлетворительным, принимая во внимание применимость методики для балок как со стальными, так и с композитными хомутами.

В седьмой главе «Практические предложения по применению высокопрочных материалов в новых конструкциях повышенной долговечности и внедрению результатов исследования» разработаны новые конструкции из СВПБ и АКП с использованием представленных методов расчета.

В сравнении с традиционным тяжелым бетоном СВПБ обладает значительно более высокой прочностью при сжатии и растяжении, а также самоуплотнением. Эти качества подтолкнули к идее создания облегченных тонкостенных СВПБ-конструкций. В качестве таковой запроектирована и испытана модель двутавровой СВПБ-балки (рисунок 41). Толщина ее стенки составляла всего 20 мм, толщина полок – переменная от края к стенке 20–30 мм.

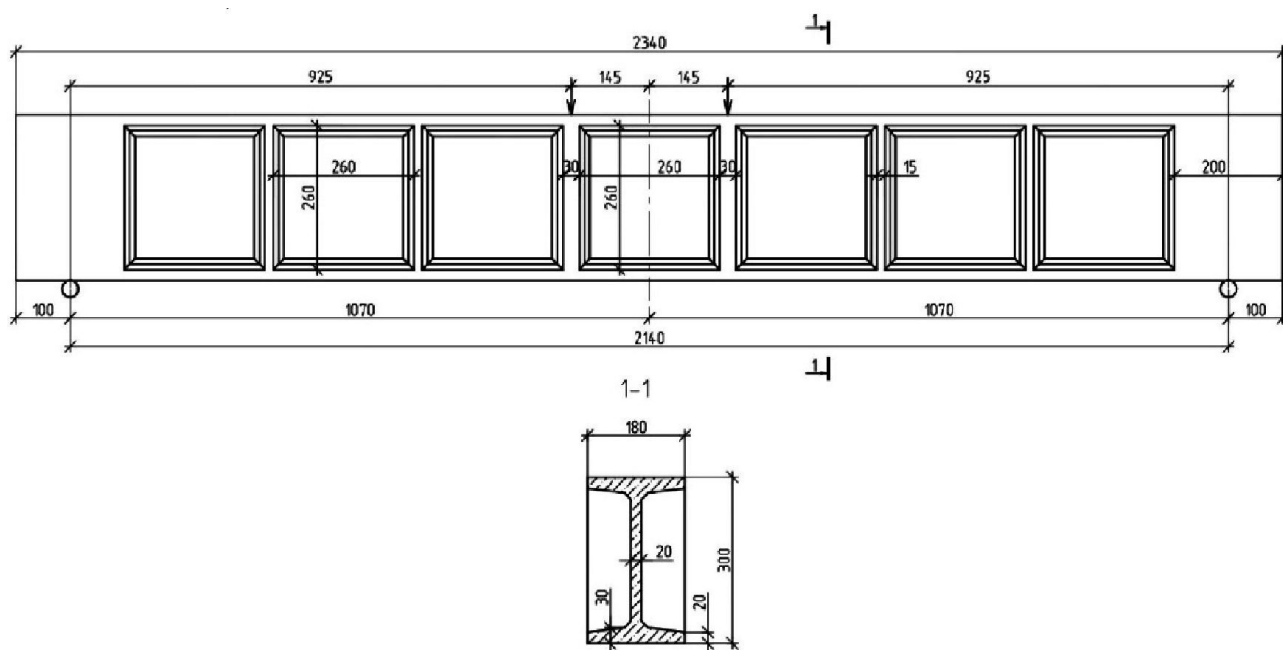


Рисунок 41 – Геометрические размеры балки

Испытаниями исследована работа нормальных сечений опытных образцов. Они показали, что несмотря на допущенные отступления от требований норм в части величины защитного слоя, была обеспечена совместная работа СВПБ и стержней рабочей арматуры вплоть до разрушения (рисунок 42).



Рисунок 42 – Вид балки после разрушения

Облегченная балка может служить пролетным строением открытых для обзора пешеходных мостов, а также применяться в промышленных зданиях и сооружениях в качестве несущей конструкции настилов под небольшие нагрузки, эксплуатируемых в условиях воздействия агрессивных сред.

В выпускаемых в настоящее время заводом АО СЗ «ОБД» (г. Краснодар) трехслойных панелях связь бетонных слоев осуществляется армированными бетонными ребрами. Принципиальным недостатком такой конструкции является образование сквозного теплопроводного включения, приводящего к значительным теплотерям. В качестве альтернативы жестким железобетонным связям предлагаются гибкие связи из композитной арматуры. Такое решение исключает теплотехнические недостатки трехслойной панели.

Проведены экспериментальные и численные исследования работы узла анкеровки гибких связей из композитной арматуры в теле железобетонной панели. Прочность анкеровки определяли для гибких связей, расположенных как нормально, так и под углом 45° к плоскости панели. Установлено, что среднее значение относительной прочности анкерного узла при вертикальном расположении связей примерно на 15% выше, чем при наклонном. Этот результат согласуется с площадями поверхностей конусов выкалывания, полученными при КЭ-расчетах с примененными в нашей работе моделями бетона и арматуры в ABAQUS (рисунок 43).

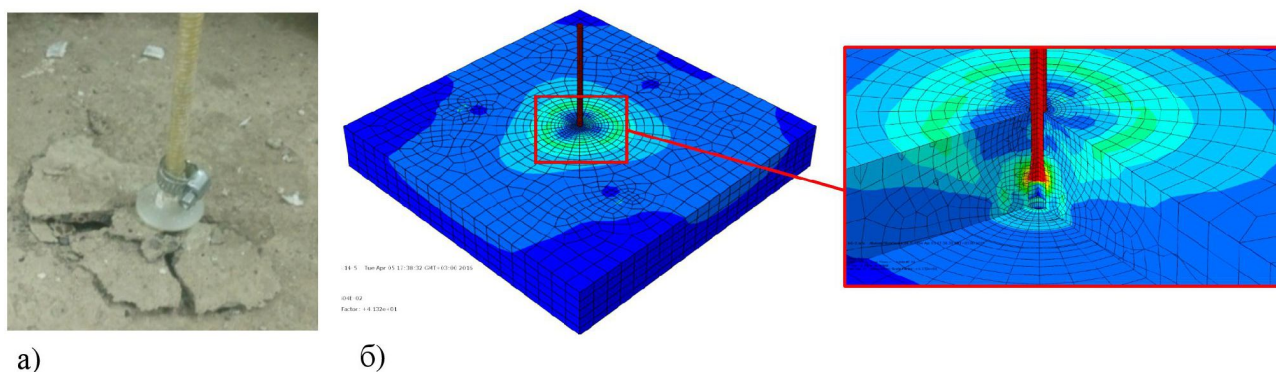


Рисунок 43 – Опытный (а) и расчетный (б) конусы выкалывания бетона

По полученным значениям прочности узлов анкеровки гибких связей рассчитано необходимое их количество для панели ПНС-1 производства АО СЗ «ОБД».

Внедрение результатов диссертационного исследования осуществлено в практику проектирования, производства сборного железобетона, композитной арматуры и стальных фибр, нормативно-техническую документацию и учебный процесс.

Внедрение в практику проектирования производилось в ходе расчетов, конструирования и технико-экономических обоснований строительных конструкций объектов Южного федерального округа. Методики расчета опробованы специалистами АО ТИЖГП «Краснодаргражданпроект», АО «Кубаньводпроект» и ООО ПИ «Адыгегражданпроект».

Внедрение в практику производства сборного железобетона осуществлялось изготовлением опытных партий облегченных двутавровых балок из СВПБ (ООО «СЗ «ИСК «БУДМАР»») и трехслойных навесных панелей на гибких композитных связях предложенной конструкции из СВПБ и обычных бетонов (АО СЗ «ОБД»), проектированием и производством конструкций и изделий из высокопрочных и сверхвысокопрочных композитных материалов (АО «ОЗЖБИ»).

Внедрение в нормативно-техническую документацию производилось разработкой новых и внесением изменений в существующие стандарты предприятий. Разработаны Стандарты Предприятий «Трехслойные навесные панели с гибкими связями» (АО СЗ «ОБД», Краснодар) и «Облегченные двутавровые балки из СВПБ» (ООО «СЗ «ИСК «БУДМАР», Краснодар) для применения при возведении многоэтажных жилых домов в Краснодарском крае и Ростовской области. Внесены изменения в стандарты ОАО «БМЗ» (Москва) в части рекомендаций по изготовлению бетонов высоких классов прочности с применением стальных фибр (2024 г.) и ООО «НЗК» (Новосибирск) – по изготовлению изделий из АКП для поперечного армирования изгибаемых элементов (2023 г.).

Внедрение в учебный процесс производилось в 5 вузах Южного, Северо-Кавказского и Уральского федеральных округов.

Внедрение результатов дало экономический эффект в сумме более 100 млн руб. за счет экономии бетона, арматуры, уменьшения размеров и материалоемкости конструкций, повышения их долговечности за счет повышенной сопротивляемости воздействиям агрессивных сред.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Итоги выполненного исследования

1. **Выявлено отсутствие научно обоснованной методологии расчета изгибаемых конструкций** из сверхвысокопрочного бетона с фиброй и без нее, со стержневой стальной и композитной арматурой, учитывающей особенности их свойств. **Определены перспективные пути совершенствования расчетного аппарата с использованием цифровых технологий.**

2. **Выполнен большой объем экспериментальных исследований** изгибаемых элементов прямоугольного и двутаврового сечений из СВПБ и с вертикальной и наклонной АКП **по разработанной автором методике на оригинальном экспериментальном оборудовании**, на которое получены 4 патента РФ.

3. *Получены комплексные экспериментальные данные о сопротивлении нормальных и наклонных сечений, тонких стенок, полок и приопорных зон прямоугольных и двутавровых балок со стальным и композитным вертикальным и наклонным поперечным армированием* при варьировании в широком диапазоне прочности бетона, армирования, пролета среза и угла наклона поперечного армирования.

4. *Предложена и обоснована модернизация МКЭ применительно к расчету НДС балок из СВПБ и обычного бетона с композитной арматурой* при действии изгибающих моментов и поперечных сил на основе синтеза экспериментальных результатов, нелинейных деформационных моделей и диаграмм деформирования композитов.

5. *Рекомендованы рациональные диаграммы деформирования сверхвысокопрочного бетона, фибробетона и композитной арматуры*, обоснованы их параметры для КЭ-расчетов балок прямоугольного и двутаврового сечений, включая их тонкие стенки.

6. *Даны предложения по развитию методов оценки силового сопротивления по нормальным и наклонным сечениям изгибаемых элементов* прямоугольного сечения из СВПБ и АКП *в ПК ABAQUS* на основе принципа обратного моделирования и задания композитных стержней в наклонных трещинах со сдвигом их берегов трехмерными элементами с ортотропными свойствами.

7. *Обосновано применение деформационной модели с фиксированным углом (CSMM) для расчета силового сопротивления наклонных сечений и тонких стенок* изгибаемых элементов двутаврового сечения *в ПК OpenSees* с созданием компьютерных программ.

8. *Построена методика регрессионного анализа влияния независимых переменных на сопротивление наклонных сечений и тонких стенок двутавровых балок* из сверхвысокопрочного бетона с фибровым армированием и без него, со стальным и композитным поперечным армированием.

9. *Представлена методика нейросетевого анализа сопротивления поперечной силе двутавровых балок* из тяжелого бетона и сверхвысокопрочного фибробетона со стержневой стальной и композитной арматурой.

10. *Определена последовательность валидации предлагаемых методик расчета с использованием цифровых технологий – нейросетевых, конечно-элементных и регрессионных:* этапы и их взаимосвязь, порядок формирования валидационного базиса.

11. *Сравнительный анализ результатов расчета* прочности, деформативности и трещиностойкости нормальных и наклонных сечений изгибаемых элементов прямоугольного и двутаврового сечений из СВПБ и АКП, с вертикальным и наклонным поперечным армированием *по предлагаемым методикам с данными опытов* автора и других исследователей *показал их достоверность* в широком диапазоне варьирования факторов.

12. *Натурными экспериментальными и численными исследованиями подтверждена эффективность предложенных облегченных двутавровых СВПБ-балок* с тонкими полками и стенками *и трехслойных навесных железобетонных панелей* с гибкими композитными связями; *изготовлены и вне-*

рены опытно-промышленные партии при строительстве реальных объектов в Южном федеральном округе.

13. Осуществлено внедрение результатов исследований: в практику проектирования при расчетах и ТЭО проектных решений; **в нормативно-техническую документацию** – в Стандартах Предприятий «Облегченные двутавровые балки из СВПБ» (ООО «СЗ «ИСК «БУДМАР», Краснодар), «Трехслойные навесные панели с гибкими связями» (АО СЗ «ОБД», Краснодар), по изготовлению СВПБ (ОАО «БМЗ», Москва) и изделий из АКП (ООО «НЗК», Новосибирск); **в учебный процесс** – в 5 вузах Южного, Северо-Кавказского и Уральского федеральных округов.

Рекомендации и перспективы дальнейшей разработки темы

Дальнейшим развитием темы могут быть теоретические и экспериментальные исследования особенностей поведения конструкций из высокопрочных и сверхвысокопрочных композитных материалов при сложных видах НДС.

По результатам диссертации опубликовано 50 работ:

– 20 публикаций в изданиях, входящих в перечень ВАК РФ:

1. Починок В. П., Тамов М. М. Нелинейное компьютерное моделирование работы двутавровых железобетонных балок на поперечную силу // Бетон и железобетон. – 2012. – № 5. – С. 22–24.

2. Тамов М. М., Починок В. П. Расчет прочности стенки двутавровых железобетонных балок с учетом влияния наклонных трещин от предшествующих нагрузок // Строительная механика и расчет сооружений. – 2013. – № 4 (249). – С. 33–37.

3. Починок В. П., Тамов М. М. Учет влияния имеющихся наклонных трещин в стенке на ее прочность в поперечных расчетах двутавровых железобетонных балок // Бетон и железобетон. – 2013. – № 4. – С. 19–23.

4. Усанов С. В., Тамов М. М. Трещиностойкость приопорных зон двутавровых балок с поперечным армированием из базальтокомпозитной арматуры // Инженерный вестник Дона. – 2022. – № 4 (88). – С. 344–361. – URL : <http://www.ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2022/7572>

5. Тамов М. М., Руденко О. В., Усанов С. В. Инженерная методика расчета сопротивления стенки армированных бетонных двутавровых балок по прочности сжатого бетона между наклонными трещинами // Электронный сетевой политематический журнал «Научные труды КубГТУ». – 2022. – № 5. – С. 10–21. – URL : <https://ntk.kubstu.ru/data/mc/0091/4518.pdf>

6. Тамов М. М., Руденко О. В., Усанов С. В. Нейросетевое прогнозирование сопротивления поперечной силе армированных бетонных двутавровых балок // Вестник МГСУ. – 2022. – Т. 17. – № 9. – С. 1145–1159. – DOI: 10.22227/1997-0935.2022.9.1145-1159.

7. Тамов М. М., Салиб М. И. Ф., Абуизеих Ю. К. И., Софьяников О. Д. Подбор составов и исследование прочностных характеристик самоуплотняющегося сверхвысокопрочного сталефибробетона // Известия высших учебных заведений. Строительство. – 2022. – № 4 (760). – С. 25–39. – DOI: 10.32683/0536-1052-2022-760-4-25-39.

8. **Тамов М. М.**, Руденко О. В., Усанов С. В. Нелинейная конечно-элементная модель для расчета прочности стенки двутавровых балок с композитным поперечным армированием // Научные труды КубГТУ. – 2023. – № 1. – С. 10–16. – URL : <https://ntk.kubstu.ru/data/mc/0093/4564.pdf>
9. Усанов С. В., **Тамов М. М.** Сравнительный анализ формул российских и зарубежных норм для расчета прочности стенок двутавровых балок со стальным и композитным поперечным армированием // Инженерный вестник Дона. – 2023. – № 2 (98). – С. 382–388. – URL : <http://www.ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2023/8225>
10. **Тамов М. М.**, Салиб М. И. Ф. Особенности образования и раскрытия наклонных трещин в двутавровых балках из сверхвысокопрочного бетона // Научные труды КубГТУ. – 2023. – № 6. – С. 27–37. – URL : <https://ntk.kubstu.ru/data/mc/0103/4725.pdf>
11. **Тамов М. М.**, Руденко О. В., Салиб М. И. Ф. Нейросетевые расчеты прочности наклонных сечений балок из сверхвысокопрочного бетона // Промышленное и гражданское строительство. – 2024. – № 4. – С. 50–57. – DOI: 10.33622/0869-7019.2024.04.50-57.
12. Салиб М. И. Ф., **Тамов М. М.** Прочность наклонных сечений двутавровых балок из сверхвысокопрочного бетона // Инженерный вестник Дона. – 2024. – № 1(109). – С. 369–381. – URL : <http://www.ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2024/8952>
13. Салиб М. И. Ф., **Тамов М. М.** Нелинейная конечно-элементная модель для расчета на поперечную силу двутавровых балок из сверхвысокопрочного бетона // Инженерный вестник Дона. – 2024. – № 10 (118). – С. 354–365. – URL : http://ivdon.ru/uploads/article/pdf/IVD_84N9y24_Salib_Tamov.pdf_a3f2cc9a9f.pdf
14. **Тамов М. М.**, Абуизеих Ю. К. И. Влияние коэффициента продольного армирования на характер работы балок из сверхвысокопрочного фибробетона // Электронный сетевой политематический журнал «Научные труды КубГТУ». – 2025. – № 2. – С. 10–21. – URL : <https://ntk.kubstu.ru/data/mc/0110/4985.pdf>
15. **Тамов М. М.** Численное моделирование балок из сверхвысокопрочного бетона средствами объектно-ориентированного программирования // Сетевое научное издание «Вестник евразийской науки». – 2025. – Т. 17. – № 2. – URL : <https://esj.today/PDF/15SAVN225.pdf>
16. **Тамов М. М.**, Руденко О. В., Салиб М. И. Ф. Моделирование сопротивления поперечным силам балок из сверхвысокопрочного бетона инструментами статистического обучения // Современные тенденции в строительстве, градостроительстве и планировке территорий. – 2025. – № 4 (2). – С. 7–21. – DOI: 10.23947/2949-1835-2025-4-2-7-20.
17. **Тамов М. М.**, Абуизеих Ю. К. И., Никора Н. И. Трещиностойкость балок из сверхвысокопрочного сталефибробетона // Инженерный вестник Дона. – 2025. – № 9 (129). – С. 421–430. – URL : http://www.ivdon.ru/uploads/article/pdf/IVD_70N9y25_Tamov.pdf_979a64331d.pdf
18. **Тамов М. М.** Сопротивление наклонных сечений железобетонных балок с композитной поперечной арматурой // Эксперт: теория и практика. – 2025. – № 2 (29). – С. 57–61. – DOI: 10.51608/26867818_2025_2_57.

19. **Тамов М. М.** Численные модели балок с композитным армированием наклонных сечений // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В. Г. Шухова. – 2026. – № 2. – С. 20–29. – DOI: 10.34031/2071-7318-2025-11-2-20-29.

20. **Тамов М. М.** Методы расчета балок из сверхвысокопрочного сталефибробетона с применением цифровых инструментов // Электронный сетевой политематический журнал «Научные труды КубГТУ». – 2026. – № 1. – С. 183–198. – URL : <https://ntk.kubstu.ru/data/mc/0123/5147.pdf>

- 4 патента РФ:

21. Патент на полезную модель № 114154 U1 Российская Федерация, МПК G01N 3/00. Рычажно-рамная испытательная установка : № 2011144452/28 : заявл. 02.11.2011 : опубл. 10.03.2012 / В. П. Починок, М. А. Тамов, **М. М. Тамов**; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Кубанский государственный технологический университет».

22. Патент на полезную модель № 163303 U1 Российская Федерация, МПК G01N 3/20. Установка для статических испытаний крупномасштабных моделей строительных конструкций на поперечный изгиб : № 2015135981/28 : заявл. 25.08.2015 : опубл. 10.07.2016 / М. А. Тамов, **М. М. Тамов**, В. П. Починок, С. В. Усанов; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Кубанский государственный технологический университет».

23. Патент на полезную модель № 215721 U1 Российская Федерация, МПК E04G 11/00. Опалубка двутавровых и тавровых балок : № 2022124510 : заявл. 16.09.2022 : опубл. 22.12.2022 / **М. М. Тамов**, О. Д. Софьяников, М. И. Ф. Салиб, Ю. К. И. Абуизеих ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Кубанский государственный технологический университет».

24. Патент на полезную модель № 215722 U1 Российская Федерация, МПК E04G 9/08. Опалубка ребристых плит перекрытия и покрытия : № 2022124511 : заявл. 16.09.2022 : опубл. 22.12.2022 / **М. М. Тамов**, О. Д. Софьяников, М. И. Ф. Салиб, Ю. К. И. Абуизеих; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Кубанский государственный технологический университет».

- 7 публикаций в изданиях Scopus и Web of Science:

25. **Tamov M.**, Pochinok V., Korenevskiy V., Mo Y. L. Effect of load history on shear strength of reinforced concrete I-Beams // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2018. – Vol. 365 : 21st Conference "Construction – The Formation of Living Environment", Moscow, 25–27 Apr. 2018. – P. 042022. – DOI: 10.1088/1757-899X/365/4/042022.

26. Pochinok V. P., Greshkina E. V., Tamov M. A., **Tamov M. M.** Effect of transverse compression on web-crushing strength of reinforced concrete I-shaped

beams // Actual Issues of Mechanical Engineering (AIME 2018) : Proceedings of the International Conference, Novosibirsk, 19–21 Apr. 2018. – Novosibirsk : Atlantis Press, 2018. – Vol. 157. – P. 595–600. – DOI: 10.2991/aime-18.2018.114.

27. Pochinok V. P., **Tamov M. M.**, Greshkina E. V. Nonlinear shear analysis of I-shaped beams with arbitrary inclination angles of shear reinforcement // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2020. – Vol. 869 : XXIII Int. Conf. on Advance in Civil Engineering "Construction – The Formation of Living Environment", Hanoi, 23–26 Sept. 2020. – P. 052057. – DOI: 10.1088/1757-899X/869/5/052057.

28. Pochinok V. P., Greshkina E. V., **Tamov M. M.** Finite element modeling of complexly stressed reinforced concrete structures // Lecture Notes in Civil Engineering. – 2022. – Vol. 182. – P. 161–171. – DOI: 10.1007/978-3-030-85236-8_13.

29. Usanov S. V., **Tamov M. M.** Shear crack resistance of I-shaped concrete beams with basalt FRP stirrups // Lecture Notes in Civil Engineering. – 2023. – Vol. 335. – P. 107–118. – DOI: 10.1007/978-3-031-30570-2_10.

30. Abuizeih Y. Q. Y., **Tamov M. M.**, Leonova A. N., Mailyan D. R., Nikora N. I. Numerical simulation of nonlinear bending behaviour of UHPC beams // Construction Materials and Products. – 2025. – Vol. 8 (4). – DOI: 10.58224/2618-7183-2025-8-4-6.

31. Abuizeih Y. Q. Y., **Tamov M. M.** Structural behavior of ultra-high performance concrete beams with different rebar and fiber reinforcement ratios // Magazine of Civil Engineering. – 2025. – Vol. 7 (139). – DOI: 10.34910/MCE.139.8.

- 2 монографии:

32. **Тамов М. М.**, Усанов С. В. Прочность стенок двутавровых балок с композитной поперечной арматурой : монография. – Краснодар : Кубанский гос. технол. ун-т, 2023. – 174 с. – ISBN 978-5-8333-1332-9.

33. **Тамов М. М.**, Салиб М. И. Ф. Работа на поперечные силы двутавровых балок из сверхвысокопрочного сталефибробетона : монография. – Краснодар : Кубанский гос. технол. ун-т, 2025. – 178 с. – ISBN 978-5-8333-1412-8.

- 17 публикаций в других изданиях:

34. Починок В. П., **Тамов М. М.** Прочность наклонных сечений железобетонных балок при малых пролетах среза // Сборник студенческих научных работ, отмеченных наградами на конкурсах. – Краснодар : КубГТУ, 2006. – С. 53–55.

35. **Тамов М. М.**, Починок В. П. Влияние наклонных трещин предшествующих загрузений на характер разрушения и прочность тонкой стенки железобетонных двутавровых балок при изменении пролета среза (постановка задачи) // Материалы 6-й Международной научно-практической конференции «Строительство в прибрежных курортных регионах». – Сочи, 2010. – С. 100–103.

36. **Тамов М. М.** Особенности развития наклонных трещин и схем разрушения стенки двутавровых железобетонных балок при изменении пролета среза // Материалы X Международной научно-технической конференции «Эффективные строительные конструкции: теория и практика». – Пенза, 2010. – С. 51–53.

37. **Тамов М. М.**, Починок В. П. Влияние наклонных трещин предшествующих загрузжений на характер разрушения и прочность тонкой стенки железобетонных двутавровых балок при изменении пролета среза // Ползуновский альманах. – 2010. – № 2. – С. 311–313.

38. **Тамов М. М.**, Починок В. П. Прочность стенки двутавровых железобетонных балок с системой трещин предшествующего загрузжения при изменении пролета среза // Материалы Международной научно-практической конференции «Строительство-2011». – Ростов-на-Дону, 2011. – С. 59–60.

39. **Тамов М. М.** Влияние изменения пролета среза на характер работы железобетонных двутавровых балок на поперечную силу // Наука Кубани. – 2011. – № 2. – С. 48–51.

40. **Tamov M.**, Pochinok V., Mo Y. L. Behavior of Reinforced Concrete I-Beams Under Changing Shear Span // Texas Section ASCE 2012 Meeting : Proceedings. – San Antonio, Texas, USA, 18–21 April 2012.

41. **Тамов М. М.**, Табагуа Г. Р., Починок В.П. Прочность узла анкеровки гибких связей из стеклопластиковой арматуры в керамзитобетонных панелях // Девелопмент и инновации в строительстве: сборник статей Международного научно-практического конгресса, Краснодар, 18–19 апреля 2018 года. – Краснодар : ООО «ОМЕГА САЙНС», 2018. – С. 266–274.

42. Усанов С. В., **Тамов М. М.** Особенности применения композитной полимерной арматуры в качестве поперечного армирования бетонных конструкций // Девелопмент и инновации в строительстве: сборник статей Международного научно-практического конгресса, Краснодар, 18–19 апреля 2018 года. – Краснодар : Общество с ограниченной ответственностью «ОМЕГА САЙНС», 2018. – С. 285–291.

43. **Тамов М. М.**, Салиб М. И. Ф. Сверхвысокопрочный фибробетон на основе материалов, доступных в Краснодарском крае // Сб. тез. Краевой отчетной конф. грантодержателей Кубанского научного фонда, Сочи, 24–25 июня 2021 г. / отв. ред. В. В. Анисимов; Мин-во образования, науки и молодежной политики Краснодарского края; Унитарная некоммерческая организация «Кубанский научный фонд». – Краснодар : УНКО «Кубанский научный фонд», 2021. – С. 88–90.

44. Усанов С. В., **Тамов М. М.** Особенности образования и развития косых трещин в бетонных балках с композитным армированием наклонных сечений // Материалы LXIV Междунар. науч.-практ. конф. «Технические науки: проблемы и решения». – М., 2022. – № 9(59). – С. 69–74.

45. **Тамов М. М.**, Салиб М. И. Ф., Абуизеих Ю. К. И., Софьяников О. Д. Облегченные конструкции перекрытий из сверхвысокопрочного сталефибробетона // Передовые исследования Кубани: сб. материалов Ежегодной отчетной конф. грантодержателей Кубанского научного фонда, Сочи, 20–22 июня 2022 г. – Краснодар : УНКО «Кубанский научный фонд», 2022. – С. 204–211.

46. **Тамов М. М.**, Руденко О. В., Усанов С. В. Применение нейросетевого моделирования при регрессионном анализе прочности стенки армированных бетонных двутавровых балок // Материалы Всерос. науч.-практ. конф. «Прикладная математика и информатика в современном мире». – Краснодар, 2022. – С. 172–181.

47. **Тамов М. М.**, Усанов С. В. Прочность стенок двутавровых балок с композитным поперечным армированием // Актуальные вопросы строительства: взгляд в будущее: сб. науч. ст. по материалам Всерос. науч.-практ. конф., посвященной 40-летию создания Инженерно-строительного института, Красноярск, 19–21 окт. 2022 г. – Красноярск : Сиб. федер. ун-т, 2022. – С. 311–313.

48. **Тамов М. М.**, Салиб М. И. Ф. Напряженно-деформированное состояние приопорных участков двутавровых балок из сверхвысокопрочного бетона // Современные научные исследования. Актуальные вопросы, достижения и инновации: сб. ст. XXXVIII Междунар. науч.-практ. конф. – Пенза : МЦНС «Наука и просвещение», 2024. – С. 31–34.

49. Щербак Д. В., **Тамов М. М.** Расчет сопротивления наклонных сечений балок с композитной поперечной арматурой // Сб. лучших науч. работ молодых ученых. – Краснодар : Кубанский гос. технол. ун-т, 2024. – С. 516–521.

50. Абуизеих Ю. К. И., **Тамов М. М.** Способы подбора составов самоуплотняющихся сверхвысокопрочных фибробетонов // Современные бетоны и технологии: проблемы, решения, перспективы : материалы III Международной научно-практической конференции. – Краснодар, 2025. – С. 7–11.