

На правах рукописи

УТКИН ДМИТРИЙ ГЕННАДЬЕВИЧ

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДА РАСЧЕТА ПРОЧНОСТИ
СЖАТО-ИЗОГНУТЫХ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ
С ЗОННЫМ АРМИРОВАНИЕМ ИЗ СТАЛЬНОЙ ФИБРЫ ПРИ
КРАТКОВРЕМЕННОМ ДИНАМИЧЕСКОМ НАГРУЖЕНИИ**

05.23.01 – Строительные конструкции, здания и сооружения

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Томск – 2009

Работа выполнена в Государственном образовательном учреждении высшего профессионального образования Томском государственном архитектурно-строительном университете (ГОУ ВПО ТГАСУ)

Научный руководитель

кандидат технических наук, доцент

Балдин Игорь Владимирович

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, профессор

Полищук Анатолий Иванович

кандидат технических наук, профессор

Яров Вячеслав Алексеевич

Ведущая организация

ОАО Центральный научно-исследовательский
и проектно-экспериментальный институт
промышленных зданий и сооружений
(ЦНИИПромзданий)

Защита состоится 18 декабря 2009 г. в 16:00 часов на заседании диссертационного совета Д212.265.01 при Томском государственном архитектурно-строительном университете по адресу: 634003 г. Томск, пл. Соляная 2, ауд. 307/5,

Факс: (3822) 65-03-37, e-mail: tsuab@sibmail.com

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке Томского государственного архитектурно-строительного университета

Автореферат разослан «16» ноября 2009 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета

Копаница Н.О.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы: В последние годы все чаще возникает необходимость проектирования железобетонных конструкций, подвергающихся воздействию интенсивных кратковременных динамических нагрузок. Опасность действия на сооружения ударных волн возрастает вследствие взрывов обычных взрывчатых веществ при их хранении, транспортировке и т.д. Возникающие при этом специфические нагрузки часто вызывают значительные повреждения конструкций, и даже их полное или частичное разрушение, которое может привести к травмам и гибели людей. В связи с этим, при проектировании и расчете несущих железобетонных конструкций, учет возможности воздействия на них кратковременных динамических нагрузок в настоящее время является актуальным.

На современном этапе развития строительства достигнуть повышения надежности и экономичности возводимых зданий и сооружений возможно как применением более эффективных материалов, так и опираясь на новые методы расчета, более полно учитывающие поведение конструкций под нагрузкой, а также напряженно-деформированное состояние материалов конструкции.

Одним из новых и перспективных строительных материалов является сталефибробетон, повышенные прочностные и деформативные свойства которого были исследованы и проанализированы различными, как российскими, так и зарубежными учеными. В России и за рубежом элементы и конструкции с применением сталефибробетона получили широкое применение в различных областях строительства.

Большинство имеющихся на сегодняшний день теоретических и экспериментальных исследований работы железобетонных элементов с зонным армированием из стальной фибры проводились для статически нагруженных конструкций, в литературе практически отсутствуют данные об исследованиях сталефиброжелезобетонных элементов при воздействии на них кратковременной динамической нагрузки. Заложенный в СП 52-104-2006 «Сталефибробетонные конструкции» метод расчета сталефиброжелезобетонных элементов по двум группам предельных состояний также ограничивается расчетами статически нагруженных элементов.

Анализ литературных источников показал, что на сегодняшний день не существует современного метода, обладающего единым методологическим подходом при описании поведения сжато – изогнутых железобетонных элементов с зонным армированием из стальной фибры, как в растянутой, так и в сжатой зонах с различным уровнем продольной сжимающей силы при кратковременном динамическом нагружении.

Таким образом, совершенствование метода расчета сжато-изогнутых железобетонных элементов с зонным армированием, как в сжатой, так и в растянутой зонах при кратковременном динамическом нагружении является

актуальным и имеющим важное практическое значение при проектировании экономичных и надежных железобетонных конструкций.

Объект исследования: сжато-изогнутые железобетонные элементы прямоугольного сечения с зонным армированием из стальной фибры в сжатой, либо в растянутой зоне сечения.

Предмет исследования: влияние величины и расположения зонного армирования из стальной фибры на прочность и деформативность изгибаемых и сжато-изогнутых железобетонных элементов при кратковременном динамическом нагружении.

Цель работы: Разработка, экспериментальная проверка и реализация метода расчета прочности нормальных сечений сжато-изогнутых железобетонных элементов с зонным армированием из стальной фибры в сжатой или растянутой зонах при кратковременном динамическом нагружении с учетом нелинейной работы материалов.

Задачи исследований:

- на основе обзора, систематизации и анализа существующих теоретических и экспериментальных исследований сформулировать предпосылки, предельные состояния и способы их нормирования для расчета сжато-изогнутых железобетонных элементов с зонным армированием из стальной фибры при кратковременном динамическом нагружении;

- разработать метод расчета прочности нормальных сечений сжато-изогнутых железобетонных элементов с зонным армированием из стальной фибры при кратковременном динамическом нагружении на основе деформационной модели с использованием реальных диаграмм деформирования бетона, сталефибробетона и арматуры;

- провести экспериментальные исследования железобетонных балок с зонным армированием из стальной фибры при кратковременном динамическом изгибе и изгибе со сжатием, при различном уровне продольной сжимающей силы;

- провести сопоставление результатов расчета по разработанному методу с результатами экспериментальных исследований, выявить влияние зонного армирования из стальной фибры на прочность и деформативность железобетонных элементов при кратковременном динамическом нагружении.

Методология работы: Теоретические исследования выполнены на основе использования фундаментальных положений теории железобетона и композиционных материалов. Физический эксперимент выполнялся с использованием современного измерительно-вычислительного оборудования в лаборатории железобетонных и каменных конструкций Томского государственного архитектурно-строительного университета, что обеспечило необходимую достоверность полученных результатов.

Научная новизна работы заключается в получении новых данных о прочности и деформативности сжато-изогнутых железобетонных элементов с

зонным армированием из стальной фибры при кратковременном динамическом нагружении, а именно:

- в аналитическом виде получено решение задач по описанию нелинейной диаграммы деформирования сталефибробетона при сжатии и растяжении, расчету прочности и оценки несущей способности сжато-изогнутых железобетонных элементов с зонным армированием из стальной фибры при кратковременном динамическом нагружении;

- установлено, что применение зонного армирования из стальной фибры в растянутой или сжатой зонах, величиной 0,2 и 0,3 от высоты сечения для сжато-изогнутых железобетонных элементов при кратковременном динамическом нагружении повышает их несущую способность на 18 и 22 %, энергоемкость на 6 и 10 % соответственно при армировании растянутой зоны сечения сталефибробетоном, и увеличивает несущую способность на 27 и 33 %, энергоемкость на 14 и 20 % соответственно при армировании сжатой зоны;

- получены новые экспериментальные данные о напряженно-деформированном состоянии, прочности и деформативности сжато-изогнутых сталефиброжелезобетонных элементов при кратковременном динамическом нагружении, установлено влияние размеров и расположения зонного армирования из стальной фибры в сечении и величины продольной сжимающей силы на прочность и деформативность железобетонных элементов.

Практическая значимость работы заключается в разработке метода и программы расчета прочности нормальных сечений сжато-изогнутых железобетонных элементов с зонным армированием из стальной фибры при кратковременном динамическом нагружении, позволяющего упростить решение задач проектирования и обеспечить расчетным путем их несущую способность при эксплуатации. Разработаны оригинальные стенды, устройства и установка для экспериментальных исследований сжато-изогнутых сталефиброжелезобетонных элементов при кратковременном динамическом нагружении, новизна которых подтверждена четырьмя патентами РФ.

Достоверность результатов работы: Достоверность полученных результатов обеспечивается корректным использованием основных положений теории железобетона, расчетными предпосылками, основанными на анализе обширных теоретических и экспериментальных данных о работе материалов и конструкций с зонным армированием из сталефибробетона; методологически обоснованным комплексом экспериментальных исследований, с применением сертифицированных лабораторных приборов и установок, применением современных средств регистрации деформаций бетона, сталефибробетона и арматуры, достаточной воспроизводимостью экспериментальных величин; необходимая для практического использования точность разработанного метода расчета подтверждена удовлетворительной сходимостью теоретических и экспериментальных данных.

Реализация результатов диссертационной работы: Разработанный метод и программа расчета используются в 26 ЦНИИ МО РФ при расчете сжато-изогнутых железобетонных элементов с зонным армированием из стальной фибры при кратковременном динамическом нагружении; результаты диссертационных исследований используются в Томском государственном архитектурно-строительном университете в учебном процессе при подготовке бакалавров, магистров и дипломников.

Личный вклад диссертанта:

- разработан метод, алгоритм и программа расчета прочности нормальных сечений сжато-изогнутых железобетонных элементов с зонным армированием из стальной фибры при кратковременном динамическом нагружении на основе деформационной модели с учетом реальных диаграмм деформирования материалов;

- разработан инженерный метод расчета прочности нормальных сечений сжато-изогнутых железобетонных элементов с зонным армированием из стальной фибры при кратковременном динамическом нагружении;

- получены новые опытные данные, характеризующие процесс сопротивления сжато-изогнутых сталефиброжелезобетонных элементов при кратковременном динамическом нагружении, выявлено влияние зонного армирования из стальной фибры на прочность и деформативность железобетонных элементов с различным уровнем продольной сжимающей силы;

- проведены численные исследования влияния параметров зонного сталефибрового армирования на прочность сжато-изогнутых железобетонных элементов при кратковременном динамическом нагружении.

На защиту выносятся:

- метод расчета прочности нормальных сечений сжато-изогнутых железобетонных элементов с зонным армированием из стальной фибры при кратковременном динамическом нагружении на основе деформационной модели с учетом реальных диаграмм деформирования материалов;

- результаты численных расчетов прочности нормальных сечений сжато-изогнутых сталефиброжелезобетонных элементов с учетом влияния геометрических и прочностных характеристик стальной фибры и величины зонного сталефибрового армирования в сжатой или растянутой зонах при кратковременном динамическом нагружении;

- инженерный метод расчета прочности сжато-изогнутых железобетонных элементов с зонным армированием из стальной фибры при кратковременном динамическом нагружении на основе областей относительного сопротивления;

- методика и результаты экспериментальных исследований изгибаемых и сжато-изогнутых железобетонных элементов с зонным армированием из стальной фибры при кратковременном динамическом нагружении.

Апробация работы.

Материалы диссертационной работы были доложены, обсуждены и получили положительную оценку: на научных семинарах кафедры железобетонных и каменных конструкций Томского государственного архитектурно-строительного университета (2004-2009 гг.); на десятой научно-технической конференции Общества железобетонщиков Сибири и Урала (Новосибирск, 23-25 ноября 2004 г., НГАСУ); на V Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Молодежь и современные информационные технологии» (г. Томск, 2007 г. ТПУ), на VI Международной конференции студентов и молодых ученых «Перспективы развития фундаментальных наук» (г. Томск, ТПУ, 26-29 мая 2009 г.). В полном объеме работа доложена и одобрена на межкафедральном семинаре ТГАСУ (5 ноября 2009 г.).

Публикации. По материалам диссертации опубликовано тринадцать печатных работ, в том числе четыре патента РФ на полезную модель и две статьи без соавторов, одна из которых опубликована в журнале «Вестник ТГАСУ», входящем в перечень изданий, рекомендованных ВАК для опубликования основных научных результатов диссертаций на соискание ученой степени кандидата технических наук.

Объем и структура диссертации. Диссертация объемом 185 страниц машинописного текста состоит из введения, четырех глав, основных выводов, списка литературы из 160 наименований, трех таблиц, 83 рисунков, одного приложения.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность проводимых исследований, дана краткая характеристика состояния вопроса, сформулирована цель работы, раскрыта ее научная новизна и практическая ценность полученных результатов, излагается структура диссертации.

В первой главе приведен обзор исследований по изучаемому вопросу и дан их анализ, в частности приведены общие сведения о сталефибробетоне, его прочностных и деформативных характеристиках. Выполнен обзор и анализ теоретических и экспериментальных исследований железобетонных конструкций с зонным армированием из стальной фибры на действие статической и кратковременной динамической нагрузки.

Впервые исследования, посвященные бетону, косвенно армированному «железным волокном» или «железной соломой», были выполнены российским инженером В.П. Некрасовым в начале двадцатого века. К этому времени относятся также работы G.F. Porter (1910 г., USA), Feilken (1914 г., UK). В Советском Союзе, а затем в России основу знаний о сталефибробетоне сформировали отечественные ученые: В.К. Кравинскис, Л.Г. Курбатов, И.А. Лобанов, А.П. Павлов, Ф.Н. Рабинович, В.П. Романов, Г.К. Хайдуков и др. Ис-

следованиями свойств композита – сталефибробетона и разработкой теории расчета сталефиброжелезобетонных конструкций занимались: В.Б. Арончик, Н.Н. Боровских, И.В. Волков, В.П. Вылегжанин, Г.В. Гетун, В.И. Григорьев, В.М. Косарев, М.П. Леонтьев, Е.Ф. Лысенко, В.И. Соломин, И.К. Сулова, К.В. Талантова, Ф.Ц. Янкелович и др. Особенности свойств сталефибробетона и технологии производства конструкций на его основе исследовали Д.С. Аболиныш, М.А. Волков, Е.В. Гулимова, Б.А. Евсеев, Г.В. Копанский, А.В. Кобацкий, О.В. Коротышевский, А.Н. Куликов и др. Производству и исследованиям стальной фибры посвятили свои работы Ф.А. Гофштейн, В.И. Попов, А.Ю. Пышминцев, Е.А. Шабловский, Б.М. Цывьян и др. Базой для развития теории расчета сталефиброжелезобетонных конструкций стали работы по теории железобетонных конструкций В.Я. Бачинского, О.Я. Берга, В.М. Бондаренко, А.Б. Голышева, А.В. Забегаева, Н.И. Карпенко и других ученых.

Большинство из этих исследований посвящены изучению свойств сталефибробетона и формулировке методов расчета прочности и трещиностойкости сталефиброжелезобетонных элементов при статическом нагружении, а также разработке моделей дисперсно армированных бетонов и моделей деформирования фибробетонов. Исследования сталефибробетона при кратковременном динамическом нагружении ограничиваются в основном экспериментальными данными.

Большой вклад в развитие науки о сталефибробетоне внесли ученые Австрии, Австралии, Бельгии, Германии, Голландии, Испании, Канады, Китая, Польши, США, Франции, Чехии, Швейцарии, Японии и др. стран, из них необходимо отметить J.P. Romualdi, Gordon, G.B. Batson, I.A. Mandel, I.L. Carson, W.F. Chen, D.I. Hannant, B. Kelly, P.S. Mangat, A.E. Naaman, R.N. Swamy, Colin D. Johnston, D.R. Lankard, G. Ruffert, K. Kordina, J. Vodichka, и др.

В нашей стране первые исследования работы железобетона в упругой стадии при кратковременном динамическом нагружении были проведены И.М. Рабиновичем, а обоснование возможности кратковременной работы конструкции в пластической стадии и разработка метода их расчета были выполнены к 1943 г. под руководством А.А. Гвоздева. Дальнейшее развитие идеи динамического расчета железобетонных конструкций получили в работах В.А. Котляревского, Н.Н. Попова, Б.С. Расторгуева.

Основные идеи динамического расчета железобетонных конструкций были разработаны следующими учеными: Баженовым Ю.М., Бакировым Р.О., Белобровым И.К., Бондаренко В.М., Гвоздевым А.А., Жарницким В.И., Жунусовым Т.Ж., Забегаевым А.В., Карпенко Н.И., Майоровым Е.Ю., Морозовым В.И., Поповым Г.И., Рахмановым В.А., Рыковым В.И., Ставровым Г.И., а дальнейшее развитие методы динамического расчета получили в работах Беликова А.А., Копаницы Д.Г., Котляревского В. А., Кумпяка О.Г., Плевкова В.С., Плотникова А.И., Пугачева В.И., Пузанкова Ю.И., Тихонова И.Н., Тонких Г.П., Трекина Н.Н., Яковенко Г.П., Балдина И.В. и других авторов.

Проведенный автором анализ методов расчета железобетонных конструкций на кратковременные динамические воздействия позволил выбрать для исследований в теоретической части метод, основанный на деформационной модели с учетом динамических диаграмм деформирования бетона, сталефибробетона и арматуры, что позволяет учесть основные закономерности работы материалов и, как следствие, иметь представление о напряженно-деформированном состоянии нормальных сечений на всем протяжении работы конструкции.

Вторая глава посвящена разработке метода расчета сжато-изогнутых железобетонных элементов с зонным армированием из стальной фибры при кратковременном динамическом нагружении.

Поскольку данные воздействия относятся к аварийным, основное требование, предъявляемое к зданиям и сооружениям, состоит в том, что они должны выдержать без обрушения однократное воздействие кратковременной динамической нагрузки.

Расчет отдельных конструкций и несущей системы зданий в целом на воздействие кратковременной динамической нагрузки производится по первой группе предельных состояний. Состояние 1а устанавливается для конструкций, в которых не допускается возникновения остаточных деформаций, вызывающих необходимость восстановительного ремонта конструкций или их замены. При состоянии 1б не допускается потеря несущей способности конструкции. В случае разрушения сжатой зоны бетона или обрыва растянутой арматуры возникает состояние 1в. При расчете сталефиброжелезобетонных конструкций на кратковременное динамическое воздействие нормирование предельных состояний осуществляется при помощи абсолютных или относительных предельных усилий, а также деформативных параметров.

Физической основой метода расчета сталефиброжелезобетонных элементов при кратковременном динамическом нагружении являются действительные нелинейные диаграммы деформирования бетона, фибробетона и арматуры, аналитическое описание которых получено на основе обобщения имеющихся экспериментальных данных. Основные параметрические точки на диаграммах при кратковременном динамическом нагружении трансформируются вдоль временной координаты. Аналитическое описание диаграмм и коэффициентов динамического упрочнения для бетона и арматуры получены на основе логарифмических зависимостей профессоров Ю.М. Баженова и Г.И. Попова.

Нелинейная диаграмма деформирования и коэффициенты динамического упрочнения для сталефибробетона (рисунок 1) получены на основе работ В.И. Григорьева, Л.Г. Курбатова, Ф.Н. Рабиновича и результатов собственных исследований.

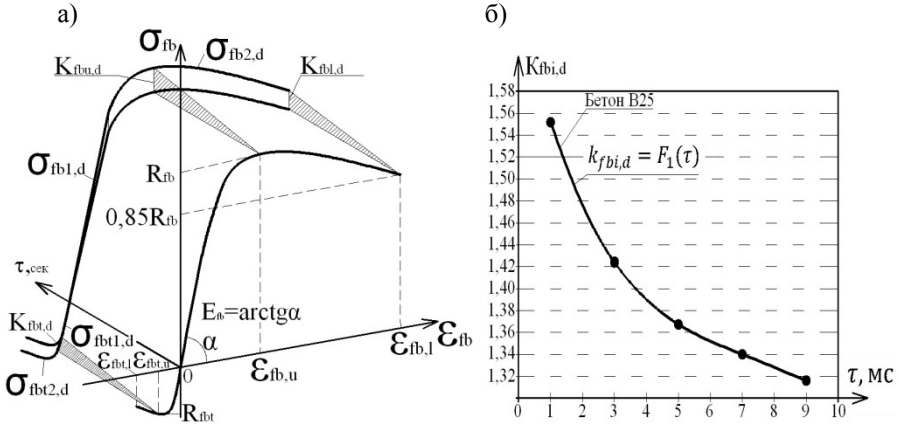


Рисунок 1 – а) - Диаграмма « $\sigma_{fb} - \epsilon_{fb}$ » для сталефибробетона при сжатии и растяжении при кратковременном динамическом нагружении; б) - изменение коэффициента динамического упрочнения для сталефибробетона во времени действия динамической нагрузки.

Для сталефибробетона диаграмма « $\sigma_{fb} - \epsilon_{fb}$ » при сжатии описывается для восходящей ветви при $0 \leq \epsilon_{fb} \leq \epsilon_{fb,u}$ выражением:

$$\sigma_{fb1,d} = R_{fb,d} \cdot \left[2 \cdot \frac{\epsilon_{fb}}{\epsilon_{fb,u}} - \left(\frac{\epsilon_{fb}}{\epsilon_{fb,u}} \right)^2 \right]. \quad (1)$$

Для нисходящей ветви, характеризующей неупругую работу сталефибробетона при $\epsilon_{fb,u} < \epsilon_{fb} \leq \epsilon_{fb,l}$, заложена зависимость:

$$\sigma_{fb2,d} = R_{fb,d} \cdot \left[1 - 0,15 \cdot \left(\frac{\epsilon_{fb} - \epsilon_{fb,u}}{\epsilon_{fb,l} - \epsilon_{fb,u}} \right) \right]. \quad (2)$$

Для сталефибробетона диаграмма « $\sigma_{fbt} - \epsilon_{fbt}$ » при растяжении описывается выражениями (1) и (2), в которых вместо характеристик ($\sigma_{fb1,d}$, $\sigma_{fb2,d}$, $R_{fb,d}$, ϵ_{fb} , $\epsilon_{fb,u}$ и $\epsilon_{fb,l}$) используются соответственно значения ($\sigma_{fbt1,d}$, $\sigma_{fbt2,d}$, $R_{fbt,d}$, ϵ_{fbt} , $\epsilon_{fbt,u}$ и $\epsilon_{fbt,l}$).

Коэффициенты динамического упрочнения сталефибробетона при сжатии и растяжении определяются выражениями:

$$\begin{aligned} k_{fbi,d} &= 1,558 - 0,31 * \lg \tau + 0,062 * (\lg \tau)^2, \\ k_{fbti,d} &= 1,485 - 0,25 * \lg \tau + 0,059 * (\lg \tau)^2. \end{aligned} \quad (3)$$

Динамический расчет изгибаемых и сжато-изогнутых сталефиброжелезобетонных элементов производится с помощью стандартных электронно-вычислительных комплексов, основанных на методе конечных элементов, а также аналитическим методом. В диссертации рассмотрены дифференциальные уравнения движения сталефиброжелезобетонного элемента, нагруженно-го поперечной динамической нагрузкой, с приложенной продольной силой, в упругой, упругопластической и пластической стадиях работы элемента.

Анализ выполненных расчетов пространственных систем зданий и сооружений показал, что при динамическом нагружении сталефиброжелезобетонных элементов с учетом их совместной работы, возможной податливости опорных устройств и других факторов, величины усилий N и M достигают максимальных значений в разные промежутки времени. При этом с уменьшением продолжительности действия динамической нагрузки эффект снижения перемещений и усилий возрастает, а процесс достижения их максимальных значений может носить колебательный характер. В результате динамического расчета получается массив действующих усилий, который используется в дальнейшем для оценки прочности сталефиброжелезобетонных элементов.

Большое внимание в работе уделено совершенствованию метода расчета прочности изгибаемых и сжато-изогнутых железобетонных элементов с зонным армированием из стальной фибры при кратковременном динамическом нагружении, реализующего деформационную модель с учетом нелинейных диаграмм деформирования бетона, сталефибробетона и арматуры.

В диссертации условия относительной прочности нормальных сечений стержневых сталефиброжелезобетонных элементов определены численно, на основе деформационной модели, и аналитически. Предельные изгибающие моменты, воспринимаемые сталефиброжелезобетонным элементом, приняты относительно центра тяжести бетонного сечения. За единичные параметры приняты несущая способность бетонного сечения при сжатии и сжатии с изгибом относительно его центра тяжести. Получены уравнения равновесия внешних сил и внутренних усилий в нормальном сечении сталефиброжелезобетонного элемента в абсолютных и относительных величинах. Уравнения равновесия в относительных величинах запишутся в виде:

$$\begin{aligned}\alpha_{m,\max}(t) &\leq \alpha_{mb} + \alpha_{ms} + \alpha_{mfbt}(\alpha_{mfb}) + \alpha_{msc} ; \\ \alpha_{n,\max}(t) &\leq \alpha_{nb} + \alpha_{ns} + \alpha_{nfbt}(\alpha_{nfb}) + \alpha_{nsc} .\end{aligned}\quad (4)$$

В условиях (4) $\alpha_{n,\max}(t) = \frac{N_{\max}(t)}{(R_{b,d}A)}$ – относительная действующая продольная сила; $\alpha_{m,\max}(t) = \frac{M_{\max}(t)}{(R_{b,d}S)}$ – относительный действующий изгибающий момент; $\alpha_{mb} = \frac{S_b}{S}$ – относительный изгибающий момент, воспринимаемый

бетоном сжатой зоны сечения; $\alpha_{nb} = \xi$ - относительная продольная сила, воспринимаемая бетоном сжатой зоны сечения; $\alpha_{ms} = \sum_{j=1}^n \frac{\sigma_{sj}(t)A_{sj}Z_{sj}}{R_{b,d}S_j}$ - относительный изгибающий момент, воспринимаемый растянутой арматурой сечения; $\alpha_{ns} = \sum_{j=1}^n \frac{\sigma_{sj}(t)A_{sj}}{R_{b,d}A}$ - относительная продольная сила, воспринимаемая растянутой арматурой сечения; $\alpha_{mfbt} = \sum_{k=1}^n \frac{\sigma_{fbtk}(t)A_{fbt}Z_{fbtk}}{R_{b,d}S_k}$ - относительный изгибающий момент, воспринимаемый сталефибробетоном растянутой зоны сечения; $\alpha_{nfbt} = \sum_{k=1}^n \frac{\sigma_{fbtk}(t)A_{fbt}}{R_{b,d}A}$ - относительная продольная сила, воспринимаемая сталефибробетоном растянутой зоны сечения; $\alpha_{mfb} = \sum_{k=1}^n \frac{\sigma_{fbk}(t)A_{fbk}Z_{fbk}}{R_{b,d}S_k}$ - относительный изгибающий момент, воспринимаемый сталефибробетоном сжатой зоны сечения; $\alpha_{nfb} = \sum_{k=1}^n \frac{\sigma_{fbk}(t)A_{fbk}}{R_{b,d}A}$ - относительная продольная сила, воспринимаемая сталефибробетоном сжатой зоны сечения; $\alpha_{msc} = \sum_{n=1}^n \frac{\sigma_{scn}(t)A'_{sn}Z_{scn}}{R_{b,d}S_n}$ - относительный изгибающий момент, воспринимаемый сжатой арматурой сечения; $\alpha_{nsc} = \sum_{n=1}^n \frac{\sigma_{scn}(t)A'_{sn}}{R_{b,d}A}$ - относительная продольная сила, воспринимаемая сжатой арматурой сечения.

Разработанный метод расчета сталефиброжелезобетонных элементов реализует деформационную модель с учетом динамических диаграмм деформирования бетона, арматуры и сталефибробетона, исходя из их напряженно-деформированного состояния на всех стадиях работы элемента. При этом за критерий исчерпания динамической прочности нормального сечения принимается достижение деформациями растянутой арматуры и сжатого бетона (сталефибробетона) в рассматриваемом сечении элемента их предельных значений.

При этом значения предельных деформаций для бетона и арматуры приняты согласно СП 52-101-2003, а для фибробетона - на основе литературных данных и данных, полученных в результате испытаний контрольных образцов при проведении экспериментальных исследований.

Процесс вычисления внутренних усилий в сжато-изогнутом сталефиброжелезобетонном элементе разбивается на 67 этапов, на каждом из которых определяются значения высоты сжатой зоны бетона (фибробетона), деформаций бетона (сталефибробетона) сжатой зоны сечения, сталефибробетона растянутой зоны сечения, сжатой и растянутой арматуры.

Далее, на основании аналитических зависимостей, описываемых диаграммы деформирования бетона, арматуры и сталефибробетона, производится определение напряжений в каждом из этих материалов по вычисленным значениям деформаций. По полученным значениям напряжений осуществляется послойное суммирование усредненных в пределах слоев значений внутренних усилий. В результате определяются предельные относительные про-

дольные усилия и изгибающие моменты, воспринимаемые нормальным сечением, которые являются координатами, описывающими область относительного сопротивления по прочности нормального сечения сжато-изогнутого сталефиброжелезобетонного элемента при кратковременном динамическом нагружении.

Жесткопластическая модель материалов положена в основу инженерного метода расчета прочности нормальных сечений сжато-изогнутых сталефиброжелезобетонных элементов с использованием областей относительного сопротивления по прочности.

Аналитически описаны и выявлены закономерности построения области относительно сопротивления по прочности нормальных сечений для железобетонных элементов с зонным армированием из стальной фибры, как в растянутой, так и в сжатой зонах сечения элемента.

Условия относительной прочности сжато-изогнутого сталефиброжелезобетонного элемента при зонном армировании из стальной фибры в растянутой (сжатой) зонах приняты на основе условия (4), в котором вместо реальных напряжений в бетоне, арматуре и фибробетоне, изменяющихся в процессе нагружения элемента, приняты значения расчетных сопротивлений этих материалов, определяемых с учетом нормативных источников (СП 52-104-2006 – для фибробетона, и СНиП 2.03.01-84* - для бетона и арматуры).

Для железобетонных элементов область относительного сопротивления аппроксимирована двумя кривыми области прочности бетонного сечения, которые перемещаются вертикально по наклонным направляющим, зависящим от расположения арматуры в сечении. При применении зонного армирования из стальной фибры в растянутой зоне происходит смещение области относительного сопротивления влево и вверх по параболической траектории (рисунок 2-а), при зонном сталефибровом армировании в сжатой зоне смещение области происходит вправо вверх по параболе – рисунок 2-б.

При кратковременном динамическом нагружении область относительно сопротивления прочности трансформируется вдоль временной координаты.

Полученные области относительного сопротивления позволяют оценить прочность сталефиброжелезобетонного элемента при любом сочетании продольных сил и изгибающих моментов.

Большая наглядность при расчетах прочности сталефиброжелезобетонных элементов достигается при векторном представлении относительных усилий, возникающих в рассматриваемых сечениях, части или элементе в целом от внешних динамических воздействий, полученных в результате динамического расчета. При этом каждому воздействию или сумме воздействий будут соответствовать компоненты векторов действующих относительных усилий: $\alpha_{ni} = N_i(t)/(R_{bd}A)$, $\alpha_{mi} = M_i(t)/(R_{bd}S)$.

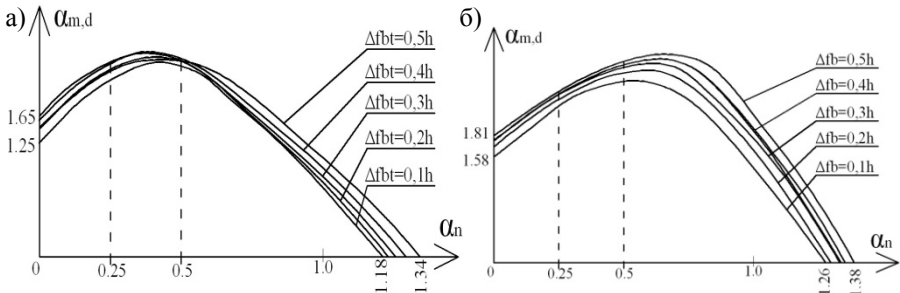


Рисунок 3 – Характерные графики изменения несущей способности сжато-изогнутого сталефиброжелезобетонного элемента в зависимости от высоты зонного армирования из стальной фибры: а) - в растянутой зоне сечения; б) – в сжатой зоне.

Третья глава посвящена экспериментальным исследованиям сжато-изогнутых железобетонных балок с зонным армированием из стальной фибры в растянутой или сжатой зонах при кратковременном динамическом нагружении.

Программа экспериментальных исследований (рисунок 4) включает в себя испытание двух железобетонных и шестнадцати сталефиброжелезобетонных балок при кратковременном динамическом нагружении. Зонное армирование из стальной фибры, высотой 0,2 h и 0,3 h, применялось либо в растянутой, либо в сжатой зонах. Было испытано по четыре образца для каждого варианта зонного армирования, два из которых испытывалось при кратковременном динамическом поперечном изгибе, а два - при кратковременном динамическом поперечном изгибе с обжатием, с различным уровнем продольного сжимающего усилия.

Экспериментальные образцы представляют собой железобетонные балки прямоугольного сечения 100 x 200 мм (рисунок 4), длиной 2200 мм, с расчетным пролетом 2000 мм. Балки армировались вязаными пространственными каркасами с нижней рабочей арматурой (2Ø12 А-400С), верхняя арматура - из двух стержней Ø 6 А-240. Поперечная арматура выполнена в виде гнутых хомутов из проволоки Ø 5 В500 с шагом 75 мм в приопорной зоне. Для зонного армирования железобетонных балок применялась фибра (2 % по объему бетона), нарезанная из стальной полосы, сечением 0,4 x 0,6 мм длиной 40 мм по ТУ 67-987-88.

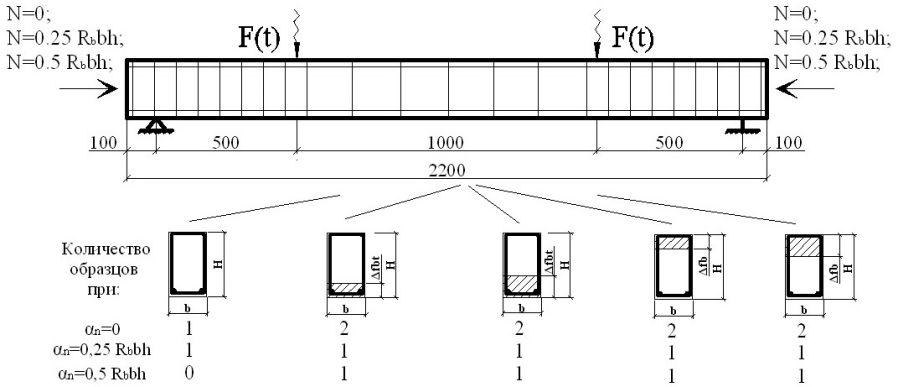


Рисунок 4 – Программа экспериментальных исследований

Для проведения экспериментальных исследований были разработаны оригинальная установка и стенды для испытания сталефиброжелезобетонных элементов при кратковременном динамическом нагружении (рисунок 5).

Методика проведения экспериментальных исследований, конструктивное решение испытательных стендов, измерительных устройств и автоматизированная установка для испытания строительных конструкций обладают новизной, что подтверждено четырьмя патентами РФ.

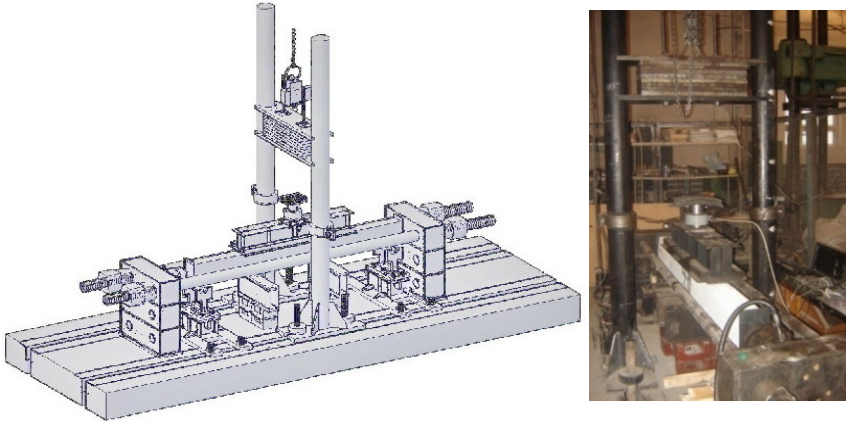


Рисунок 5 – Общий вид стенда для испытания сжато-изогнутых сталефиброжелезобетонных элементов при кратковременном динамическом нагружении.

Для измерения деформаций бетона и сталефибробетона применялись тензорезисторы марки ПКБ – 50 с базой 50 мм, деформаций растянутой арматуры - тензорезисторы марки ПКБ – 10 базой 10 мм по два датчика на каждый стержень. Для фиксирования ускорения были установлены 5 акселерометров по длине элемента с одинаковым расстоянием друг от друга. В тех же точках, что и акселерометры, располагались и датчики перемещений. Также акселерометры располагались на силоизмерителе и на грузосбрасывателе для определения скорости падения груза. Балки испытывались кратковременной динамической нагрузкой, приложенной в четвертях расчетного пролета.

В результате проведенных экспериментов установлены зависимости деформативности бетона, сталефибробетона и арматуры, несущей способности, характера развития трещин и разрушения образцов, изменения энергоемкости и прогибов сталефиброжелезобетонных элементов от величины продольного усилия и параметров зонного сталефибрового армирования при кратковременном динамическом нагружении. На рисунке 6 представлены характерное изменение кратковременном динамической нагрузки и опорных реакций во времени (рисунок 6,а) и гистограмма изменения реакции системы для экспериментальных балок при кратковременном динамическом нагружении в зависимости от толщины и расположения слоя зонного армирования из стальной фибры, а также величины продольной сжимающей нагрузки (рисунок 6,б).

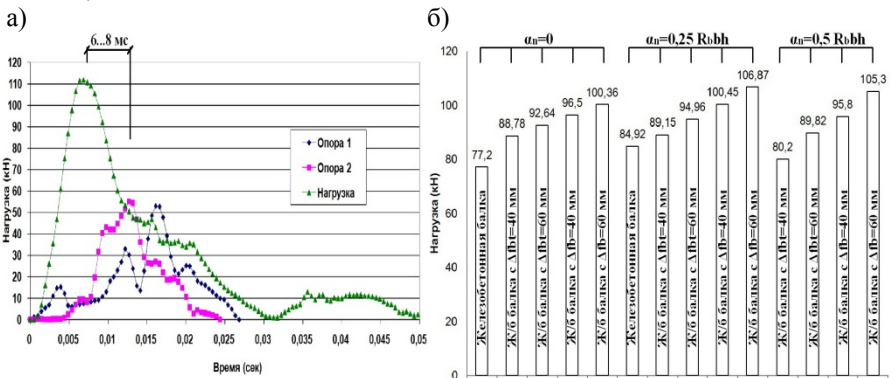


Рисунок 6: а) – характерное изменение динамической нагрузки и опорных реакций во времени; б) - изменение реакции системы при испытании сталефиброжелезобетонных элементов при кратковременном динамическом нагружении в зависимости от уровня продольной сжимающей силы.

Полученные при экспериментальных исследованиях схемы разрушения и трещинообразования элементов (рисунок 7) показали, что железобетонные балки с зонным сталефибровым армированием в растянутой зоне разрушились вследствие образования и дальнейшего раскрытия по высоте нормаль-

ных трещин по всей длине балки с дальнейшим разрушением сжатой зоны бетона. У балок с зонным армированием из стальной фибры в сжатой зоне разрушение происходит вследствие образования нормальных трещин по длине балки и при дальнейшем развитии трещин в процессе загрузки происходит незначительное разрушение сжатой зоны бетона. При увеличении уровня продольной сжимающей силы наблюдается более характерное разрушение сжатой зоны бетона, а количество нормальных трещин по длине балки уменьшается, основное разрушение происходит в центральной части элемента.

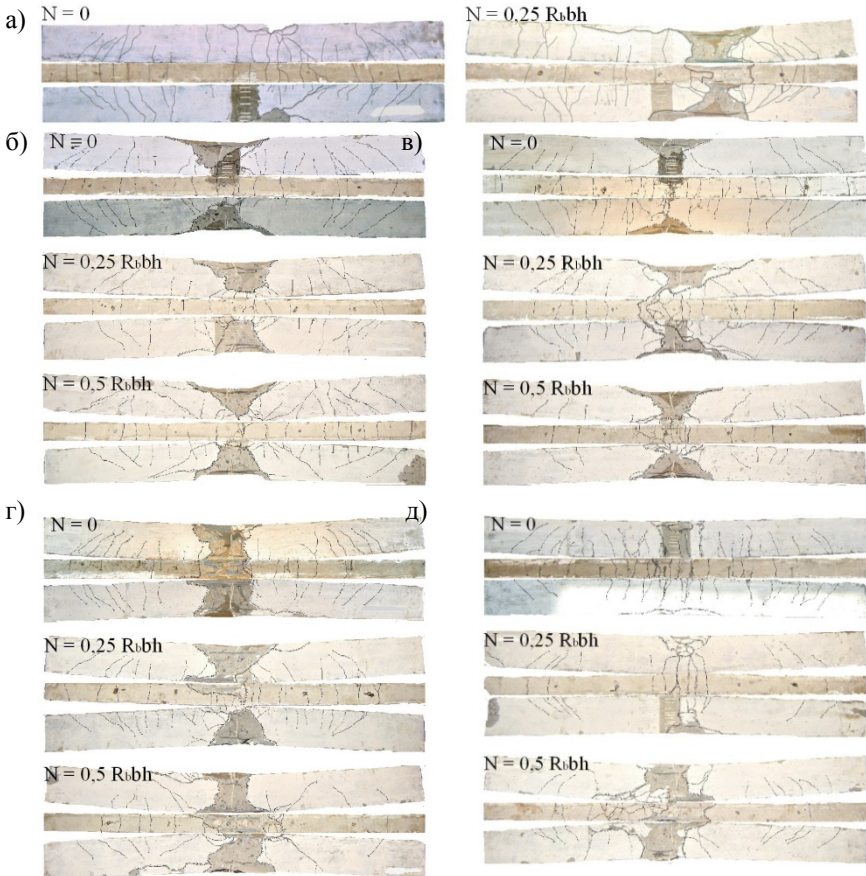


Рисунок 7 - Схемы разрушения и трещинообразования балок: а) – железобетонная балка; б) – железобетонная балка с $\Delta f_{bt} = 40$ мм; в) – железобетонная балка с $\Delta f_{bt} = 60$ мм; г) – железобетонная балка с $\Delta f_b = 40$ мм; д) – железобетонная балка с $\Delta f_b = 60$ мм.

Одной из важных характеристик работы конструкции при динамическом нагружении является ее энергоемкость. Энергоемкость опытных балок оценивалась как работа, затраченная на их разрушение. Она подсчитывалась по графикам прогибов в момент наступления в конструкции предельных состояний:

$$A_6 = \int_0^{y_{el(pl)}} P dy \quad (5)$$

где A_6 – энергоемкость балки, P – нагрузка, $y_{el(pl)}$ – прогибы балки при достижении предельного состояния Ia или Ib, определяемые по формуле

$$y_{el(pl)} = \int_0^{l_0} y dx. \quad (6)$$

При расчете по формулам (5) и (6) интегрирование велось численно методом трапеций. Для повышения точности интегрирования применялась *spline* интерполяция значений прогибов по пролету балки.

Анализ эффективности применения зонного армирования из стальной фибры для изгибаемых и сжато-изогнутых железобетонных элементов при различном уровне продольной сжимающей силы показал:

- использование зонного сталефибрового армирования в растянутой зоне, толщиной 40 мм и 60 мм при нулевом уровне продольной сжимающей силы для изгибаемых железобетонных элементов повышает их несущую способность на 12 % и 18%, энергоемкость на 6 % и 10 %, а максимальные прогибы уменьшаются на 22 % и 24 %;

- использование зонного сталефибрового армирования в сжатой зоне сечения, толщиной 40 мм и 60 мм при нулевом уровне продольной сжимающей силы для изгибаемых железобетонных элементов повышает их несущую способность на 20 % и 25 %, энергоемкость на 14 % и 20 %, а максимальные прогибы уменьшаются на 38 % и 43 %;

- при действии продольной сжимающей силы, равной $\alpha_n = 0,25 R_b b h$, несущая способность железобетонных и сталефиброжелезобетонных элементов повышается в среднем на 5...6 % по сравнению с изгибаемыми элементами;

- при последующем увеличении продольной сжимающей силы до уровня $\alpha_n = 0,5 R_b b h$ происходит снижение несущей способности сталефиброжелезобетонных элементов в среднем на 3...8 % по сравнению с чистым изгибом;

- наибольший эффект на несущую способность железобетонных элементов оказывает применение зонного сталефибрового армирования сжатой зоны, при этом величина такого армирования составляет 1/3 от высоты сечения элемента;

- при увеличении значения продольной сжимающей силы до $\alpha_n = 0,25 R_b b h$ величина перемещений для всех видов балок уменьшается в среднем на 9...11 % по сравнению с чистым изгибом, а при величине

$\alpha_n = 0,5 R_b b h$ величина максимальных перемещений уменьшается на 22...25 % по сравнению с чистым изгибом.

Анализ результатов экспериментальных исследований показал правомерность использования гипотезы плоских сечений при расчете сжато-изогнутых железобетонных элементов с зонным армированием из стальной фибры при кратковременном динамическом нагружении.

Четвертая глава посвящена численному исследованию прочности нормальных сечений изгибаемых и сжато-изогнутых железобетонных элементов с зонным армированием из стальной фибры при кратковременном динамическом нагружении и сопоставлению результатов теоретического расчета с результатами экспериментальных исследований. Результаты сопоставления теоретических и экспериментальных исследований сталефиброжелезобетонных элементов с зонным армированием из стальной фибры в сжатой и растянутой зонах представлены в таблице 1.

Анализ результатов расчетов на основе разработанного метода расчета прочности нормальных сечений сжато-изогнутых железобетонных элементов с зонным армированием из стальной фибры и сравнение их с результатами экспериментальных исследований при кратковременном динамическом нагружении показывают, что отклонения составляют 4-15 % в сторону запаса прочности.

Таблица 1 - Результаты расчета сжато-изогнутых сталефиброжелезобетонных элементов и сравнение с результатами экспериментальных исследований

Величина зонного сталефибрового армирования		Уровень относительной продольной силы	$\alpha_m^{эксп}$	$\alpha_m^{теор}$ (По программе JVK-NM-Fibre)	Отклонение Δ , %	$\alpha_m^{теор}$ (Инженерный метод расчета)	Отклонение Δ , %
Δ_{fbt}	Δ_{fb}						
0		0,25	2,42	2,32	4	2,23	8
40	0	0,25	2,51	2,42	4	2,37	6
		0,5	2,3	2,22	4	2,17	6
60	0	0,25	2,51	2,46	4	2,41	5
		0,5	2,48	2,25	9	2,13	14
0	40	0,25	2,75	2,62	5	2,4	13
		0,5	2,62	2,48	5	2,21	15
0	60	0,25	2,91	2,73	6	2,55	12
		0,5	2,8	2,73	4	2,45	12

В диссертации представлены графики изменения несущей способности железобетонных элементов с зонным армированием из стальной фибры, как в сжатой, так и в растянутой зонах, при кратковременном динамическом нагружении в зависимости от различных параметров: толщины зонного армирования, величины и характера армирования нормальных сечений, уровня относительной продольной сжимающей силы, размеров сечений, классов бетона и арматуры, прочностных и деформативных характеристик фибробетона.

В качестве направлений развития диссертационного исследования отмечены:

- применение высокопрочной арматуры или смешанного армирования в железобетонных элементах с зонным армированием из стальной фибры при кратковременном динамическом нагружении;
- необходимость разработки методов динамического расчета прочности и деформативности сталефиброжелезобетонных элементов различного поперечного сечения (двутаврового, таврового, трапецевидного и др.) при кратковременном динамическом сжатии, растяжении и изгибе.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Сформулированы предпосылки и разработан метод расчета прочности нормальных сечений сжато-изогнутых железобетонных элементов с зонным армированием из стальной фибры при кратковременном динамическом нагружении, основанный на деформационной модели и нелинейных диаграммах деформирования бетона, арматуры и сталефибробетона, обладающий единым методологическим подходом при расчете изгибаемых и сжато-изогнутых элементов, полнотой и наглядностью для принятия более обоснованных практических решений.

2. Разработана программа, позволяющая выполнять расчеты железобетонных элементов с зонным армированием из стальной фибры при кратковременном динамическом нагружении при любом сочетании продольной силы и изгибающего момента. Выполненные расчеты показали, что разработанный метод позволяет с точностью, достаточной для решения практических задач, определять несущую способность сжато-изогнутых железобетонных элементов с зонным армированием из стальной фибры. Отклонения теоретических результатов расчета от экспериментальных данных составляют 3-15 % в сторону запаса прочности.

3. Разработана методика экспериментальных исследований сжато-изогнутых железобетонных элементов с зонным армированием из стальной фибры при кратковременном динамическом нагружении, при реализации которой были созданы оригинальные конструкции испытательных стенов, устройств и автоматизированная установка для экспериментальных исследо-

ваний строительных конструкций, новизна которых подтверждена четырьмя патентами РФ.

4. Проведенные экспериментальные исследования железобетонных элементов с зонным армированием из стальной фибры при кратковременном динамическом нагружении позволили получить новые опытные данные, характеризующие процесс сопротивления сталефиброжелезобетонных конструкций: изменение деформаций бетона, арматуры и сталефибробетона в сечении, перемещения, ускорения, характер изменения динамической нагрузки и опорных реакций во времени на различных стадиях динамического деформирования конструкции, в зависимости от величины и расположения зонного армирования и величины относительной продольной сжимающей силы.

5. Установлено, что применение зонного армирования из стальной фибры для сжато-изогнутых железобетонных элементов повышает их несущую способность в среднем на 18...22 % при армировании сталефибробетоном растянутой зоны элемента, и на 27...33 % при армировании сжатой зоны; при действии продольной сжимающей силы, равной $\alpha_n = 0,25 R_b b h$ несущая способность сталефиброжелезобетонных элементов повышается в среднем на 5...6 % по сравнению с изгибаемыми элементами, при последующем увеличении продольной сжимающей силы, до уровня $\alpha_n = 0,5 R_b b h$ происходит снижение несущей способности сталефиброжелезобетонных элементов в среднем на 3...8 %. Установлено, что наибольший эффект на несущую способность железобетонных элементов оказывает применение зонного армирования из стальной фибры в сжатой зоне сечения, при этом величина такого армирования составляет 0,3 от высоты сечения элемента.

6. Разработанный метод расчета, а также программа расчета на ЭВМ прошли апробацию в 26 Центральном научно-исследовательском институте МО РФ и используются при расчетах сталефиброжелезобетонных конструкций специального назначения, а результаты экспериментальных исследований используются в учебном процессе при подготовке специалистов в Томском государственном архитектурно-строительном университете.

Публикации по теме диссертации Статьи в журналах, включенных в перечень ВАК

1. **Уткин, Д.Г.** Экспериментальные исследования сжато-изогнутых железобетонных элементов с зонным армированием из стальной фибры при кратковременном динамическом нагружении / Д.Г. Уткин // Вестник ТГАСУ. 2008. - № 3, С. 156-164.

Статьи в других печатных изданиях

2. Леонтьев, М.П. Исследования прочности нормальных сечений железобетонных конструкций с зонным сталефибробетонным армированием

/ М.П. Леонтьев, **Д.Г. Уткин**, И.Э. Итерман // Научные труды общества железобетонщиков Сибири и Урала. – 2005. – № 8. – С. 102-105. (доля автора 75 %).

3. Плевков, В.С. Экспериментальные исследования изгибаемых сталефиброжелезобетонных балок при кратковременном динамическом нагружении / В.С. Плевков, **Д.Г. Уткин**, М.П. Леонтьев // Материалы III Межрегиональной научно-технической конференции. – Братск 2005. – С. 92-96. (доля автора 50 %).

4. Плевков, В.С. Влияние зонного сталефибробетонного армирования в растянутой зоне изгибаемых железобетонных элементов на их прочность и трещиностойкость при статическом и кратковременном динамическом нагружениях / В.С. Плевков, М.П. Леонтьев, **Д.Г. Уткин** // Томск. гос. архит.-строит. ун-т – Томск, - Рус.-Деп. в ВИНТИ, 2005.-52 с. (доля автора 50 %).

5. Балдин, И.В. Расчет прочности нормальных сечений сталефиброжелезобетонных элементов при помощи областей относительной прочности / И.В. Балдин, **Д.Г. Уткин** // Материалы V Межрегиональной научно-технической конференции. – Братск 2007. – С. 8-11. (доля автора 80 %).

6. **Уткин, Д.Г.** Совершенствование метода расчета изгибаемых железобетонных элементов с зонным сталефибровым армированием при кратковременном динамическом нагружении / **Д.Г. Уткин** // Безопасность строительного фонда России. Проблемы и решения. Материалы международных академических чтений. – Курск 2007. – С. 151-156 (доля автора 100 %).

7. **Уткин, Д.Г.** Программа и результаты экспериментальных исследований изгибаемых и внецентренно сжатых сталефиброжелезобетонных балок при кратковременном динамическом нагружении / **Д.Г. Уткин**, А.В. Дурнов // Знания, умения, навыки – путь к созданию новых инженерных решений» материалы университетской научно - практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, посвященной 100-летию со дня рождения Никитина Н.В., выдающегося российского инженера и ученого в области строительных конструкций. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2007. – С. 85-87. (доля автора 80 %).

8. Леонтьев, М.П. Работа изгибаемых железобетонных элементов с зонным армированием из стальной фибры при статическом и кратковременном динамическом нагружении / М.П. Леонтьев, **Д.Г. Уткин** // Научно-методические проблемы в сфере проектирования, строительства и эксплуатации недвижимости. Сборник докладов семинара. Семинар-конференция юбилейных мероприятий, посвященных 175-летию СПбГАСУ. – Санкт-Петербург, 2007. – С. 66-71. (доля автора 70 %).

9. Балдин, И.В. Результаты экспериментальных исследований изгибаемых сталефиброжелезобетонных балок при кратковременном динамическом нагружении / И.В. Балдин, **Д.Г. Уткин**, А.В. Дурнов // Материалы

VI Межрегиональной научно-технической конференции. – Братск 2008. – С. 27-31. (доля автора 60 %).

Патенты

10. Пат. 75239 Российская Федерация, МПК G01N 3/00. Установка для экспериментальных исследований строительных конструкций / В.С. Плевков, Г.И. Однокопылов, **Д.Г. Уткин**, П.В. Дзюба; опубл. 27.07.2008, Бюл. № 21. – 2 с. (доля автора 70 %).

11. Пат. 74472 Российская Федерация, МПК G01N 3/303, G01M 7/08. Устройство для динамического нагружения испытываемой конструкции / В.С. Плевков, Г.И. Однокопылов, П.В. Дзюба, **Д.Г. Уткин**; опубл. 27.06.2008, Бюл. № 18. – 1 с. (доля автора 50 %).

12. Пат. 77433 Российская Федерация, МПК G01N 3/00, G01N 3/08, G01N 3/30. Стенд для испытания железобетонных элементов на кратковременный динамический изгиб / В.С. Плевков, И.В. Балдин, **Д.Г. Уткин**, А.В. Дурнов; опубл. 20.10.2008, Бюл. № 29. – 2 с. (доля автора 80 %).

13. Пат. 77434 Российская Федерация, МПК G01N 3/00, G01N 3/08, G01N 3/30. Стенд для испытания железобетонных элементов на кратковременный динамический изгиб с обжатием/ В.С. Плевков, И.В. Балдин, **Д.Г. Уткин**, А.В. Дурнов; опубл. 20.10.2008, Бюл. № 29. – 2 с. (доля автора 80 %).

УТКИН ДМИТРИЙ ГЕННАДЬЕВИЧ

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДА РАСЧЕТА ПРОЧНОСТИ СЖАТО-ИЗОГНУТЫХ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ С ЗОННЫМ АРМИРОВАНИЕМ ИЗ СТАЛЬНОЙ ФИБРЫ ПРИ КРАТКОВРЕМЕННОМ ДИНАМИЧЕСКОМ НАГРУЖЕНИИ

АВТОРЕФЕРАТ

Изд. лиц. № 021253 от 31.10.1997

Подписано в печать 13.11.2009 г. Формат 60x84 1/16

Бумага офсет. Гарнитура Таймс. Усл. – печ.л. 1. Уч.-изд. Л. 1,0.

Тираж 120 экз. Заказ № 424..

Изд-во ГОУ ВПО «ТГАСУ», 634003, Томск, пл. Соляная, 2.

Отпечатано с оригинал-макета автора в ООП ГОУ ВПО «ТГАСУ».

634003, г. Томск, ул. Партизанская, 15