

На правах рукописи



АРЗАМАСЦЕВ СЕРГЕЙ АЛЕКСАНДРОВИЧ

**ПРОЧНОСТЬ И ДЕФОРМАТИВНОСТЬ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ
ИЗГИБАЕМЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ПРИ КРУЧЕНИИ ОТ
КРАТКОВРЕМЕННЫХ ДИНАМИЧЕСКИХ НАГРУЗОК**

05.23.01 – Строительные конструкции, здания и сооружения

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Томск – 2017

**Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном
образовательном учреждении высшего образования
«Томский государственный архитектурно-строительный университет»
(ФГБОУ ВО ТГАСУ)**

Научный руководитель: **Родевич Виктор Викторович,**
кандидат технических наук, доцент.

Официальные оппоненты: **Морозов Валерий Иванович,**
доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой «Строительные
конструкции»
ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский
государственный архитектурно-строительный
университет»;

Логунова Мария Александровна,
кандидат технических наук, доцент,
ФГБОУ ВО «Новосибирский
государственный архитектурно-строительный
университет (Сибстрин)»;

Ведущая организация: **Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего
образования «Юго-Западный
государственный университет», г. Курск**

Защита состоится 22 декабря 2017 г. в 10:00 часов на заседании
диссертационного совета Д 212.265.01 при ФГБОУ ВО «Томский
государственный архитектурно-строительный университет» по адресу:
634003, г. Томск, пл. Соляная, 2, корп. 2, ауд. 303.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке Томского
государственного архитектурно-строительного университета по адресу:
634003, г. Томск, пл. Соляная, 2 и на сайте www.tsuab.ru.

Автореферат разослан _____ 2017 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Копаница Н.О.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. В последние десятилетия наблюдается повышение интереса к проектированию и строительству каркасных полносборных зданий общественного и жилого назначения. Наблюдаемая тенденция усложнения конструктивных форм зданий часто приводит к возникновению в отдельных элементах сложного напряженного состояния, обусловленного одновременным воздействием нескольких усилий. Например, анализ применяемых в Сибирском регионе новых каркасных полносборных конструктивных систем «Каскад» и «КУПАСС» показал, что в элементах перекрытия зачастую, помимо изгибающих моментов, возникают крутящие моменты значительной величины. Так, в средних рядовых ригелях перекрытия величина крутящего момента может составлять $0,05...0,15$ от величины изгибающего момента, в то время как в крайних ригелях эта величина достигает значений $0,3...0,75$ от величины изгибающего момента.

Анализ выполненных теоретических и экспериментальных исследований конструкций, подверженных изгибу с кручением, показал, что, в основном, данные исследования направлены на изучение напряженно-деформированного состояния при статическом нагружении. Исследований конструкций, работающих в условиях кратковременного динамического нагружения недостаточно. В действующих нормах проектирования расчет железобетонных конструкций на изгиб с кручением при действии кратковременной динамической нагрузки не отражен ни в каком виде.

Расчет конструкций, работающих в условиях сложного напряженного состояния, в котором находятся железобетонные элементы при одновременном воздействии изгибающего и крутящего моментов – сложная задача. Поэтому, прочностной расчет таких конструкций с учетом особенностей работы их при кратковременном динамическом нагружении должен основываться на построении расчетной модели, соответствующей реальной работе конструкции.

Данная работа выполнялась в рамках реализации комплексного проекта по договору от 12 февраля 2013 г. № 02.G25.31.0022 с Минобрнауки в рамках Постановления Правительства Российской Федерации №218 «О мерах государственной поддержки развития кооперации российских высших учебных заведений и организаций, реализующих комплексные проекты по созданию высокотехнологического производства» от 09 апреля 2010 года.

Степень разработанности темы. Исследования железобетонных элементов на изгиб с кручением, выполненные как отечественными учеными, в том числе В.Н. Байков, Э.Г. Елагин, А.С. Залесов, Н.И. Карпенко, Д.Х. Касаев, В.И. Колчунов, В.И. Морозов, Л.К. Рулле, Р.А. Складнева, В.И. Фомичев, Ю.В. Чиненков, В.К. Юдин, В.К. Ягодин, так и зарубежными Г. Гезунд, М. Коллинз, Г. Коуэн, Е. Мерш, М. Хелми, Р. Эванс и т.д., были направлены, в основном, на изучение статического воздействия нагрузки. При этом особенности работы железобетонных

конструкций на изгиб с кручением (несущая способность, характер разрушения, схемы трещинообразования, деформативность) при кратковременном динамическом нагружении исследованы недостаточно.

Цель работы. Разработка, реализация и экспериментальная проверка метода расчета по прочности железобетонных элементов при одновременном действии изгибающих и крутящих моментов от кратковременных динамических воздействий.

Задачи исследования:

- на основе анализа выполненных ранее экспериментальных и теоретических исследований определить особенности работы железобетонных элементов на изгиб с кручением, установить предельные состояния и способы их нормирования, а также предпосылки расчета железобетонных элементов при действии изгибающих и крутящих моментов от кратковременных динамических воздействий;

- разработать способы экспериментальной оценки параметров, характеризующих напряженно-деформированное состояние при изгибе с кручением, для железобетонных конструкций при кратковременном динамическом нагружении;

- разработать программу и выполнить экспериментальные исследования железобетонных элементов на изгиб с кручением при статическом и кратковременном динамическом нагружении для различных соотношений силовых факторов: крутящего (Т) и изгибающего (М) моментов;

- выполнить численные расчеты с использованием пространственной конечно-элементной модели с целью проверки выявленных особенностей работы железобетонных элементов при изгибе с кручением для соотношений моментов $\chi = T/M = 0 \dots 1$;

- с учетом полученных результатов экспериментальных и численных исследований предложить аналитический метод расчета сопротивления изгибу с кручением железобетонных элементов при кратковременном динамическом нагружении.

- выполнить оценку сходимости результатов аналитических расчетов с результатами экспериментальных исследований железобетонных конструкций, подверженных изгибу с кручением.

Объектом исследования являются железобетонные непереармированные элементы, подверженные изгибу с кручением при статическом и кратковременном динамическом нагружении, при превалирующем действии изгибающего момента к крутящему, т.е. $T/M < 1$.

Предметом исследования являются методы расчета силового сопротивления железобетонных элементов, подверженных изгибу с кручением при кратковременном динамическом нагружении.

Методология и методы исследования. Методологической основой данной работы являются исследования российских и зарубежных ученых в области расчета железобетонных конструкций на действие кратковременной динамической нагрузки. Экспериментальные исследования выполнены с

использованием современных поверенных измерительных приборов в лаборатории испытания строительных конструкций кафедры «Железобетонные и каменные конструкции» Томского государственного архитектурно-строительного университета.

Научная новизна работы заключается в следующем:

- впервые получены экспериментальные данные о напряженно-деформированном состоянии, характере трещинообразования и деформирования, схемах разрушения железобетонных конструкций, испытывающих изгиб с кручением, при кратковременном динамическом нагружении;
- предложен метод аналитического расчета железобетонных изгибаемых элементов на кручение при кратковременном динамическом нагружении, основанный на теории пластичности Губера-Мизеса-Генки с учетом пространственной расчетной модели, предложенной В.Н. Байковым для статического нагружения;
- предложена пространственная конечно-элементная модель и критерий ее разрушения, позволяющие выполнить комплекс численных исследований, в том числе с целью определения величины несущей способности железобетонной конструкции.

Теоретическая значимость работы заключается в развитии теории железобетона: установлены характер деформирования и разрушения конструкций, подверженных изгибу с кручением при кратковременном динамическом нагружении, по наклонному сечению, а также положение пространственного наклонного сечения в зависимости от соотношения крутящего момента к изгибающему; предложена расчетная модель и критерий разрушения для выполнения расчетов с целью определения несущей способности рассматриваемых конструкций.

Практическая значимость работы заключается в возможности использования при проектировании предложенного метода расчета железобетонных конструкций на изгиб с кручением при кратковременном динамическом нагружении, основанного на научно-обоснованных результатах исследований.

На защиту выносятся:

- методология и результаты экспериментальных исследований железобетонных элементов, подверженных совместному воздействию изгибающих и крутящих моментов, при статическом и кратковременном динамическом нагружениях, выполненных с использованием оригинальных устройств;
- критерий разрушения железобетонных изгибаемых элементов при кручении от действия кратковременных динамических нагрузок, основанный на полученных опытных данных и результатах исследований отечественных и зарубежных ученых;
- метод расчета железобетонных элементов на совместное действие изгибающих и крутящих моментов при кратковременном динамическом

нагрузении, учитывающий выявленные особенности работы таких конструкций.

Достоверность результатов работы обеспечивается использованием общепринятых положений теории железобетона, сопротивления материалов, теории упругости, строительной механики, а также предпосылок расчета, принятых в результате анализа широкого круга исследований конструкций, находящихся в условиях сложного напряженного состояния; проверкой предложенного метода расчета физическим экспериментом, выполненном с использованием оборудования, приборов и инструментов, имеющих свидетельства о метрологической поверке и калибровке. Корректность предложенного метода расчета подтверждается хорошей сходимостью данных эксперимента и результатов расчета.

Личный вклад диссертанта состоит:

- в разработке методологии выполнения экспериментальных исследований железобетонных элементов на изгиб с кручением при статическом и кратковременном динамическом нагружениях;
- в разработке метода расчета железобетонных элементов, работающих в условиях сложного напряженно-деформированного состояния, обусловленного воздействием изгибающих и крутящих моментов при кратковременном динамическом нагружении на основе теории пластичности Губера-Мизеса-Генки с учетом пространственной расчетной модели В.Н. Байкова;
- в предложении критерия разрушения объемной конечно-элементной модели, испытывающей изгиб с кручением, для определения предельных усилий, воспринимаемых конструкцией.

Реализация работы. Результаты теоретических и экспериментальных исследований внедрены и используются проектной организацией АО «Иркутский Промстройпроект» при проектировании однополочных и двухполочных ригелей покрытия и перекрытия здания-представителя каркасной универсальной полносборной архитектурно-строительной системы («КУПАСС») в рамках выполнения работ по комплексному проекту Министерства образования РФ № 02.G25.31.0022.

Апробация работы. Результаты экспериментальных и теоретических исследований докладывались на научных семинарах кафедры «Железобетонные и каменные конструкции» Томского государственного архитектурно-строительного университета (2013–2016 г.г.); на Международной научной конференции, посвященной 100-летию со дня рождения д.т.н. проф. Н.Н. Попова «Современные проблемы расчета железобетонных конструкций, зданий и сооружений на аварийные воздействия» (г. Москва, 2016 г., МГСУ); на Международной научной конференции «Инновационные пути развития железобетона» (г. Новосибирск, 2016 г.); на XI и XII международных конференциях

студентов и молодых ученых «Перспективы развития фундаментальных наук» (г. Томск, 2014 г., 2015 г., ТПУ); на II Международной научной конференции студентов и молодых ученых «Молодежь, наука, технологии: идеи и перспективы (МНТ)» (г. Томск, 2015 г., ТГАСУ). Основные выводы по результатам исследований доложены и одобрены на межфакультетском научном семинаре ФГБОУ ВО ТГАСУ (г. Томск, март 2017 г.).

Публикации. По материалам диссертации опубликовано 13 печатных работ, включая три статьи, опубликованные в журналах, входящих в перечень изданий, рекомендованных ВАК, 2 патента РФ на изобретение и 2 патента РФ на полезную модель.

Объем и структура работы. Диссертация объемом 181 страница машинописного текста состоит из введения, четырех глав, основных выводов, списка литературы из 183 наименований, одного приложения и содержит 10 таблиц, 86 рисунков.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении приводится обоснование актуальности темы, формулируются цель и задачи исследований, научная новизна и практическая значимость работы.

В первой главе выполнен обзор и систематизирование экспериментальных и теоретических исследований железобетонных конструкций, работающих на изгиб с кручением.

Анализ исследований, выполненных отечественными и зарубежными учеными, позволил проследить историю развития методов расчета сопротивления железобетонных элементов изгибу с кручением и чистому кручению. Первые предложения по расчету указанных конструкций были сделаны на основании схем распределения усилий в бетоне и арматуре, предложенных Е. Мершем. Именно Е. Мерш впервые сформулировал предпосылки расчетной модели, отражающие общие принципы работы арматуры и бетона в конструкции при действии крутящих моментов. Над совершенствованием модели Е. Мерша работали в свое время Э. Рауш, П. Андерсен, Г. Коуэн, Г. Эрнст, С. Армстронг и многие др. Стоит отметить, что расчетная модель, предложенная Е. Мершем, нашла свое отражение и развитие в нормах ЕКБ-ФИП. Однако, присущие данным методам расчета недостатки, в частности выполнение расчетов на совместно действующие усилия по раздельности, ведут к заложению в конструкцию излишних запасов.

Огромным шагом вперед в теории железобетона стал метод предельного равновесия, который сразу же нашел отражение в методе расчета железобетонных конструкций на изгиб с кручением, предложенном А.А. Гвоздевым и Н.Н. Лессиг. В основу метода положено составление уравнения равновесия или уравнения работы внутренних и внешних сил на виртуальных перемещениях. Данный метод вошел во все редакции норм проектирования по железобетону, начиная с 1962 г. Его развитием

занимались как отечественные исследователи О.К. Базоев, В.Н. Байков, И.В. Бахотский, П.И. Бурлаченко, В.А. Вернигор, Э.Г. Елагин, А.С. Залесов, Н.И. Карпенко, Д.Х. Касаев, В.И. Колчунов, В.И. Морозов, Г.В. Мурашкин, В.С. Плевков, Л.К. Рулле, А.Г. Сафонов, Р.А. Складнева, Н.И. Тимофеев, В.И. Фомичев, Ю.В. Чиненков, Т.П. Чистова, В.К. Юдин, В.К. Ягодин, так и зарубежные Г. Гезунд, М. Коллинз, К. Гуд, М. Хелми, Р. Эванс, М. Калил, П. Ламперт и многие др.

Установлены принципиальные различия в предложенных методах, которые можно сгруппировать следующим образом: отличия в форме образующегося пространственного сечения (характеризуется углами наклона пространственной трещины на гранях элемента); различие причин разрушения железобетонных элементов, подверженных изгибу с кручением (Н.Н. Лессиг утверждает, что разрушение происходит в результате достижения арматурой обоих направлений предела текучести и бетоном предела прочности на сжатие, а Г. Гезунд разделяет разрушение на крутильное, в результате текучести хомутов, и изгибное, в результате текучести продольной арматуры); влияние прочности бетона на несущую способность элемента (Г. Гезунд предлагает не учитывать прочность бетона при расчете); учет возможности перераспределения напряжений в элементе при одновременном наступлении текучести арматуры (Н.Н. Лессиг такой подход допускает, в отличие от других исследователей); учет касательных усилий в арматуре, наряду с нормальными.

Анализ проведенных ранее исследований показал, что развитие методов расчета железобетонных элементов на изгиб с кручением было направлено, в основном, на определение сопротивления конструкции действию статической нагрузки, исследований при кратковременном динамическом нагружении крайне не достаточно.

Во второй главе приведены результаты экспериментальных исследований железобетонных конструкций, работающих на изгиб с кручением при статическом и кратковременном динамическом нагружениях.

При выполнении экспериментальных исследований ставились следующие задачи:

- выявить особенности характера деформирования железобетонных элементов, подверженных изгибу с кручением при кратковременном динамическом нагружении в сравнении со статическим;
- определить влияние отношения силовых факторов (крутящего момента к изгибающему) на качественные и количественные характеристики сопротивления по прочности и деформативности железобетонных элементов, подверженных изгибу с кручением;
- с учетом экспериментальных данных получить предпосылки для разработки аналитического метода расчета железобетонных элементов на изгиб с кручением при кратковременном динамическом нагружении.

Для выполнения поставленных задач разработана программа экспериментальных исследований (рис. 1), включающая в себя испытание двух серий образцов на действие статической нагрузки и трех серий на действие кратковременной динамической нагрузки. Основным варьируемым показателем при испытаниях являлось отношение моментов $\chi = T / M$, принимаемое 0,4; 0,55; 0,7. Выбор соотношений силовых факторов сделан на основе анализа исследований отечественных и зарубежных ученых.

Конструкция образцов всех серий была принята одинаковой. Железобетонные элементы сечением 200 х 100 мм были армированы пространственным каркасом, выполненном из продольной арматуры Ø14 мм в растянутой зоне и Ø8 мм в сжатой класса А500СП. Поперечное армирование было представлено замкнутыми хомутами из арматуры Ø6 мм класса А240, установленными с шагом 50 мм у опор и 100 мм в пролете конструкции. Бетон тяжелый класса В25.

Физико-механические характеристики арматуры и бетона определены по результатам испытаний контрольных образцов согласно ГОСТ 12004 и ГОСТ 10180.

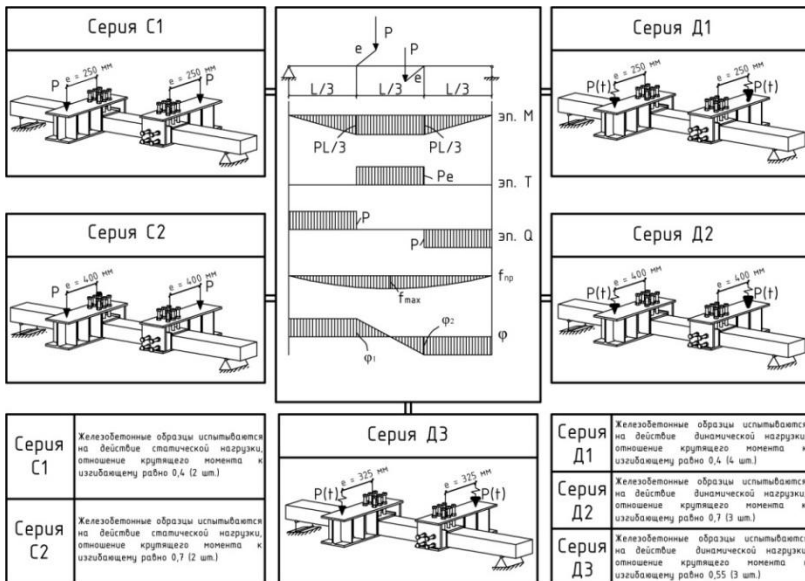


Рисунок 1 - Программа экспериментальных исследований

Физический эксперимент был выполнен на специально разработанном стенде (см. рис. 2), с применением оригинального оборудования, позволяющего получить необходимую информацию о напряженно-деформированном состоянии экспериментального образца. На экспериментальный стенд получен патент РФ на изобретение,

оригинальность применяемых устройств подтверждена двумя патентами РФ на полезную модель.

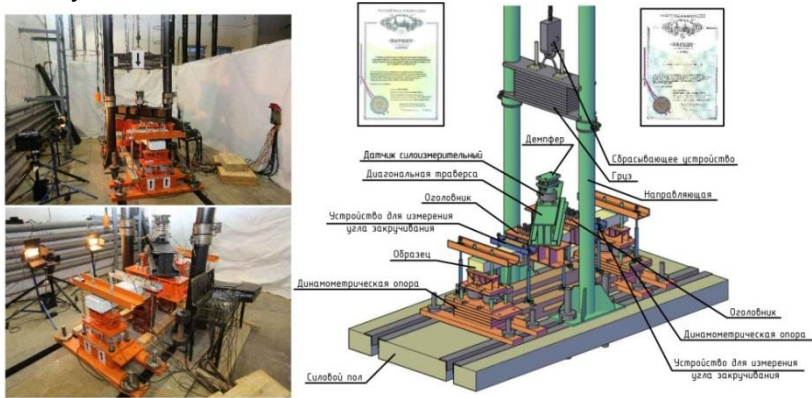


Рисунок 2 - Стенд для испытания на изгиб с кручением при кратковременном динамическом нагружении

В работе предложен способ определения угла закручивания конструкции, оригинальность которого подтверждена патентом РФ на изобретение. Предложенная схема расстановки приборов (рис. 3) позволила получить полные значения деформаций в расчетных сечениях. А математические преобразования позволяют по вычисленным прогибам конструкции определить углы закручивания конструкции по формуле (1).

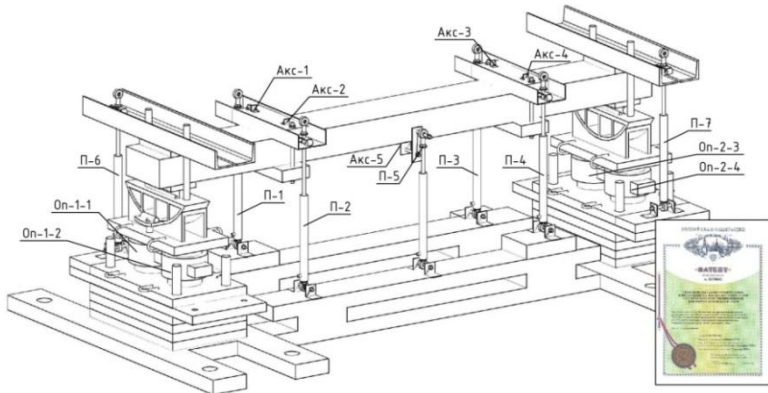


Рисунок 3 - Схема расстановки приборов (П-1...П-7 – индуктивные датчики марки RL150-G-SR; Акс-1...Акс-5 – акселерометры 1000g AERO; Оп – силоизмерительные датчики ДСТ 412)

$$\varphi = \arctg\left(\frac{f_{\max} - f_{np}}{L}\right) = \arctg\left(\frac{f_{\max} - f_{\min}}{2L}\right) \quad (1)$$

где f_{np} – значение вертикальных перемещений, вызванных воздействием изгибающего момента, в рассматриваемом сечении;

f_{max} , f_{min} – значения вертикальных перемещений двух точек, взятых на противоположных гранях образца и расположенных в одной плоскости его поперечного сечения (рис 4).

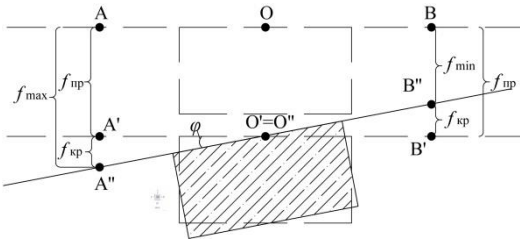


Рисунок 4 - Определение угла закручивания

Графики зависимости прогибов от изгибающего момента и углов закручивания от крутящего момента для экспериментальных образцов серий C1 и C2 приведены на рис. 5. Анализ перемещений образцов при различных соотношениях силовых факторов позволил сделать вывод, что величина $\chi = T / M$ не оказывает существенного влияния на деформативность конструкции, а преимущественно сказывается на ее прочности. С увеличением χ наблюдается уменьшение значения предельного изгибающего момента, и соответственно, увеличение значения предельного крутящего момента.

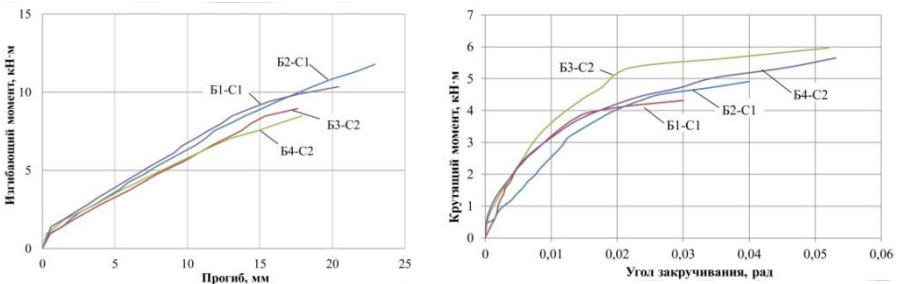


Рисунок 5 - Прогибы (слева) и углы закручивания (справа) экспериментальных образцов серий C1 и C2

Применение высокоскоростной (до 2000 кадров/с) камеры FASTCAM SA2 при испытании экспериментальных образцов на действие кратковременной динамической нагрузки позволило установить характер трещинообразования и зафиксировать процесс формирования наклонных трещин на боковых гранях во времени. Разрушение

произошло по пространственному сечению с образованием так называемых «спиральных» трещин (рис. 6). Данные трещины образовались под наклоном к продольной оси образца на растянутой от изгиба нижней грани и пересекали боковые поверхности также под наклоном к продольной оси. Перед разрушением в сжатой от изгиба зоне образовывалась трещина, соединяющая начало «спиральной» трещины с вершиной, замыкая пространственное сечение (рис. 7).

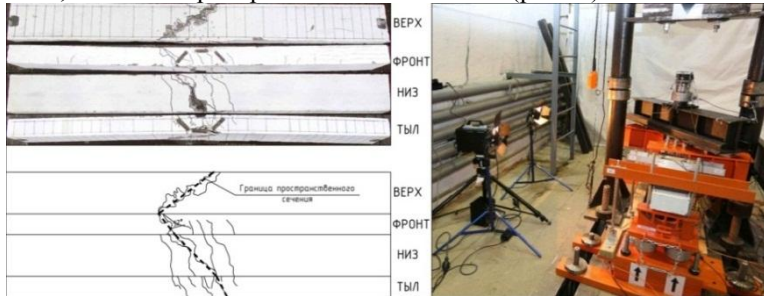


Рисунок 6 - Схема трещинообразования опытного образца и общий вид высокоскоростной камеры

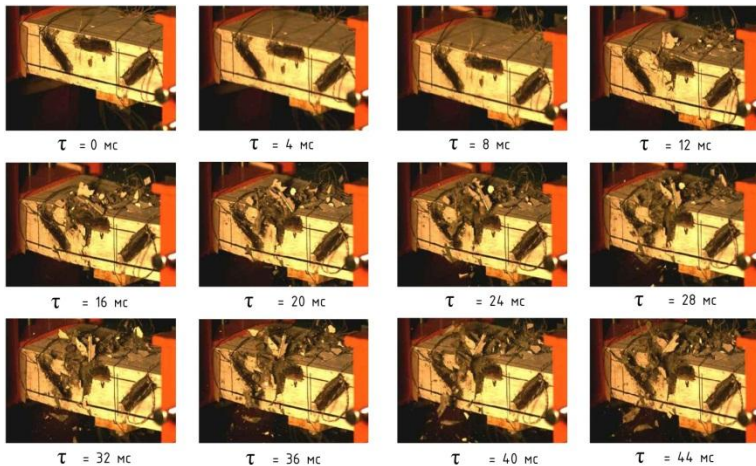


Рисунок 7 – Процесс разрушения образца во времени (съемка выполнялась с частотой 2000 кадров /с)

Для определения опорной реакции железобетонной конструкции при испытании на кратковременную динамическую нагрузку была разработана специальная динамометрическая опора. Особенность данной конструкции заключается в том, что в составе опоры разработан шарнир, обеспечивающий поворот не только в плоскости действия изгибающего момента, но и в плоскости действия крутящего момента.

Данная схема позволила создать в середине пролета железобетонного элемента площадку с постоянными величинами изгибающих и крутящих моментов. Конструкция опоры позволила с необходимой точностью зафиксировать значение опорной реакции, определяемую как сумму показаний силоизмерительных датчиков, на всем интервале времени действия кратковременной динамической нагрузки. Точность измерения опорных реакций обеспечивалась применением силоизмерительных датчиков, имеющих соответствующие свидетельства о поверке.

В результате проведения экспериментальных исследований достигнуто следующее:

- установлено влияние величины $\chi = T / M$ на прочность железобетонных элементов, подверженных изгибу с кручением;
- впервые получены опытные данные о работе железобетонных конструкций на изгиб с кручением при кратковременном динамическом нагружении;
- опытным путем определены схемы трещинообразования конструкций, подверженных изгибу с кручением при статическом и кратковременном динамическом нагружениях. Установлено, что на боковых поверхностях конструкции при изгибе с кручением образуются трещины, проходящие под углом близким 45° . Угол наклона трещин на нижней поверхности во всех случаях оказался меньше 45° , и зависел от соотношения силовых факторов $\chi = T / M$.
- выполненные испытания показали, что разрушение конструкций произошло в результате текучести продольной арматуры.

Третья глава посвящена численному исследованию прочности и деформативности железобетонных элементов, работающих на изгиб с кручением. Для этого был выполнен комплекс расчетов железобетонных конструкций на изгиб с кручением в программном комплексе «ЛИРА-САПР 2013».

Результатами экспериментальных исследований, в том числе и собственными, установлено, что разрушение железобетонных конструкций, работающих на изгиб с кручением, происходит в результате достижения арматурой какого-либо направления или обоих направлений одновременно напряжений, соответствующих пределу текучести. При этом работа продольной и поперечной арматуры происходит в условиях сложного напряженного состояния, обусловленного воздействием не только нормальных усилий, но и касательных. Поэтому в данной работе для моделирования железобетонной конструкции применяются объемные конечные элементы, позволяющие определить касательные и нормальные напряжения в элементе.

Модель экспериментального образца (рис. 8) выполнена в максимальном соответствии испытанным автором образцам. Бетон и

арматура заданы при помощи конечных элементов КЭ № 231, жесткости которым присвоены с учетом нелинейной работы материалов. Закон деформирования арматурной стали при растяжении и сжатии принят в виде двухлинейной диаграммы. Диаграмма деформирования сжатого и растянутого бетона представлена в виде трехлинейной диаграммы Прандтля. Расчетные характеристики арматуры и бетона принимались с учетом коэффициентов динамического упрочнения материалов.

Особое внимание при выполнении численных исследований было уделено моделированию опор, позволяющих создать расчетную схему, идентичную схеме работы экспериментального образца. В плоскости действия изгибающего момента экспериментальный образец работал как простая шарнирно опертая балка, что достигается введением связей, ограничивающих перемещение по вертикали (в направлении Z), и введением в одной опоре связи, ограничивающей перемещение по оси Y . В плоскости действия крутящего момента конструкция экспериментальных опор допускала поворот конструкции относительно продольной оси. Для этого были применены специальные конечные элементы односторонней связи №261, которые характеризуются работой только на сжатие либо только на растяжение по заданному направлению.

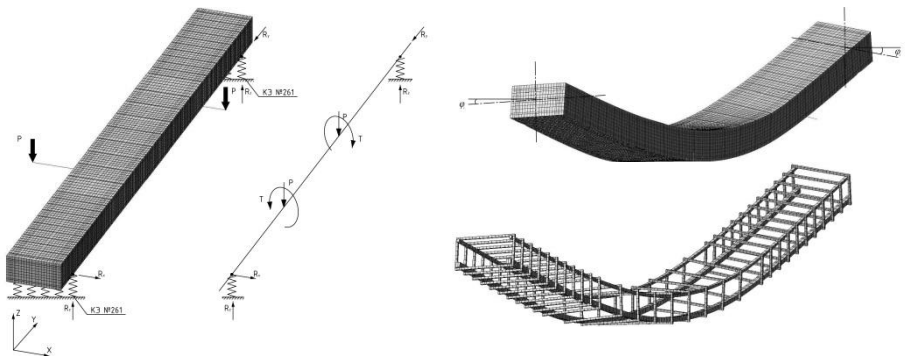


Рисунок 8 - Расчетная схема и схемы деформирования образца и арматурного каркаса

В результате расчета экспериментального образца численным методом были определены перемещения и напряжения в конструкции, характеризующие ее сложное напряженное состояние, обусловленное воздействием изгибающих и крутящих моментов. Полученные результаты расчета хорошо согласуются с результатами испытаний. Так прогиб расчетной модели отличается от экспериментального на 10-15 %, а угол закручивания, определенный по формуле (1), отличается от экспериментального на 5-12%.

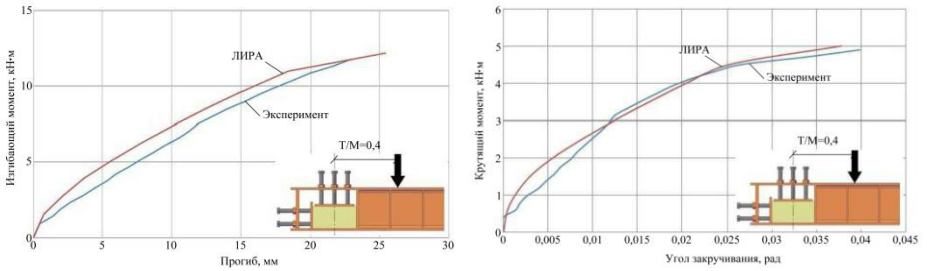


Рисунок 9 - Сравнение прогибов и углов закручивания, полученных численным расчетом и экспериментом

Анализ напряжений, возникающих в конструкции при действии изгибающих и крутящих моментов, показал, что в продольной и поперечной арматуре наряду с нормальными напряжениями возникают и значительные касательные усилия (рис. 10), которые должны учитываться при анализе напряженно-деформированного состояния арматурной стали, работающей в условиях изгиба с кручением.

Так как программный комплекс «ЛИРА-САПР 2013» в виду отсутствия критерия разрушения автоматически не приостанавливает расчет, то в данной работе в качестве критерия разрушения железобетонной конструкции, подверженной изгибу с кручением, принят момент достижения напряжениями в сложнапряженной арматуре предела текучести. При этом напряжения в продольной и поперечной арматуре определяются по формуле:

$$\sigma = \frac{\sqrt{(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2 + 6(\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2)}}{\sqrt{2}} \quad (2)$$

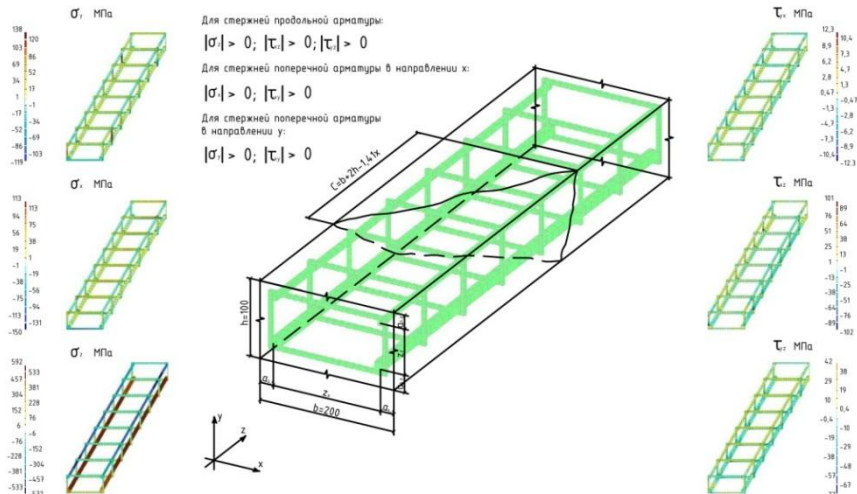


Рисунок 10 - Напряжения в арматуре расчетной модели

Определенные по зависимости (2) напряжения показали, что в продольной арматуре напряжения текучести арматурной стали наступают раньше, чем в поперечной. А разрушающая нагрузка, определенная численным расчетом, сопоставима с фактической разрушающей нагрузкой, полученной опытным путем.

Предложенная пространственная модель для расчета железобетонной конструкции на изгиб с кручением позволяет выполнить комплекс численных исследований, сократив объем физического эксперимента. А корреляция опытных данных с результатами расчета при идентичных условиях работы конструкции свидетельствует о корректности предложенной модели и полученных результатов расчетов на рассматриваемой области исследований.

Четвертая глава посвящена разработке метода расчета железобетонных конструкций изгибу с кручением при кратковременном динамическом нагружении.

Обоснованием физической модели динамического сопротивления железобетонных конструкций являются действительные диаграммы деформирования материалов, которые имеют отличия от диаграмм материалов, подверженных статическому нагружению. Существует огромное количество исследований, подтверждающих зависимость прочностных и деформативных свойств материалов от скорости деформирования или скорости нагружения конструкции. Различными авторами для описания нелинейных диаграмм материалов (бетона и арматуры) предлагаются уравнения полиномов второй, третьей и пятой степеней; уравнение эллипса; тригонометрические ряды; диаграмма Прандтля; в виде экспоненты; сплайн-функций, а также дробно-рациональных функций. В данной работе в качестве расчетных диаграмм деформирования бетона и арматуры приняты диаграммы Прандтля, параметрические точки которых для статического нагружения приведены в действующих нормах проектирования железобетонных конструкций (СП 63.13330.2012). При кратковременном динамическом нагружении происходит изменение координат параметрических точек в зависимости от скорости деформирования, которая учитывается коэффициентами динамического упрочнения материалов, принятыми для бетона на основании исследований Баженова Ю.М, для арматуры на основании исследований Попова Г.И.

Среди ученых, работавших над методами расчета железобетонных конструкций на кратковременные динамические нагрузки и применением этих методов на практике, важный вклад в развитие данного вопроса внесли Ю.М. Баженов, И.В. Балдин, И.К. Белобров, Н.Н. Белов, В.М. Бондаренко, З.Р. Галаятдинов, М.Е. Гончаров, В.И. Жарницкий, Т.Ж. Жунусов, А.В. Забегаев, Д.Г. Копаница, В.А. Котляревский, О.Г. Кумпяк, Л.Р. Маилян, А.В. Педиков, В.С. Плевков, А.И. Плотников, Г.И. Попов, Н.Н. Попов, Б.С.

Расторгуев, В.В. Родевич, Г.В. Рыков, А.Е. Саргсян, Д.Ю. Саркисов, Г.Н. Ставров, А.Г. Тамразян, Г.П. Тонких, Н.Н. Трекин и др.

В работе рассмотрены особенности работы железобетонных конструкций на изгиб с кручением, позволившие определить способы нормирования предельного состояния таких конструкций. Выполненные автором экспериментальные исследования на действие кратковременного динамического нагружения позволили установить, что разрушение конструкций при изгибе с кручением происходит по пространственному сечению. Образующаяся пространственная система находится в равновесии с внешними силами за счет сжимающих усилий в бетонных полосах и растягивающих усилий (в том числе и касательных) в продольной и поперечной арматуре. В арматуре развитие пластических деформаций с наступлением площадки текучести приводит к нарушению соответствия деформаций бетона и арматуры, что приводит к раздроблению бетона сжатой зоны и отказу конструкции. Поэтому за предельное состояние таких конструкций принимается наступление предела текучести в продольной или поперечной арматуре.

Автором предлагается нормировать конструкции, работающие на изгиб с кручением при кратковременном динамическом нагружении, по предельным усилиям:

$$\begin{aligned} M_d &\leq M_{ult,d}, \\ T_d &\leq T_{ult,d}, \end{aligned} \quad (3)$$

где M_d и T_d – изгибающий и крутящий моменты, возникающие от действия внешней нагрузки (статической и динамической), определяемые статическим и динамическим расчетом; $M_{ult,d}$ и $T_{ult,d}$ – предельные значения изгибающего и крутящего моментов, характеризующиеся развитием пластических деформаций в продольной или поперечной арматуре.

Анализ экспериментальных исследований отечественных ученых и опытных данных автора позволил установить, что в работе изгибаемого шарнирно опертого элемента, испытывающего кручение, можно выделить условно упругую стадию, характеризующую работу конструкции до и после образования трещин, а также пластическую работу блоков, разделенных пространственным пластическим шарниром после достижения предела текучести.

Внутренние усилия (M_d и T_d) от действия внешней динамической нагрузки для железобетонных конструкций при $\chi < 1$ предлагается определять как:

$$\begin{aligned} M_d &= M_p k_d + M_q, \\ T_d &= \chi (M_p k_d + M_q) \end{aligned} \quad (4)$$

где M_p – момент от действия максимального значения динамической нагрузки; M_q – момент от действия статической нагрузки (например собственный вес конструкции); k_d – коэффициент динамичности для

определения эквивалентной статической нагрузки, принимаемый на основании исследований Н.Н. Попова, Б.С. Расторгуева.

Предельный изгибающий момент в выражении (3), воспринимаемый пространственным сечением, определяется путем умножения усилий в рабочей арматуре на соответствующее плечо, равное расстоянию от центра тяжести растянутой арматуры до равнодействующего усилия в сжатом бетоне. Предельные значения изгибающего и крутящего моментов определяются из выражений:

$$\begin{aligned} M_{ult,d} &= \sigma_{z,d} z_y A_{sx}, \\ T_{ult,d} &= \chi \sigma_{z,d} z_y A_{sx}, \end{aligned} \quad (5)$$

где $\sigma_{z,d}$ - нормальные напряжения в сложнапряженной рабочей арматуре; z_y - плечо внутренней пары сил в направлении оси у (направлена вдоль высоты сечения) $A_{s,x}$ - площадь продольной арматуры у горизонтальной грани элемента.

Для определения напряжений в железобетонной конструкции при изгибе с кручением от кратковременных динамических нагрузок разработана расчетная пространственная модель, предложенная В.Н.Байковым для статических нагружений, позволяющая связать внешние нагрузки с величиной напряжений в продольной и поперечной арматуре. Нормальные напряжения ($\sigma_{z,d}$) в продольной арматуре от действия изгибающего момента и касательные напряжения ($\tau_{yz,d}$) и ($\tau_{zx,d}$) от действия крутящего момента определяются из выражений:

$$\sigma_{z,d} = \frac{M_d}{A_{sx} z_y}, \quad \tau_{zx,d} = \frac{T_d \cdot k_x}{2A_{sx} z_y}, \quad \tau_{yz,d} = \frac{T_d \cdot k_y}{2A_{sy} z_x} \quad (6)$$

где k_x, k_y - коэффициенты, учитывающие влияние поперечной арматуры на сопротивление элемента у горизонтальной и вертикальной грани, определяемые:

$$\begin{aligned} k_x &= \frac{1}{1 + \frac{2A_{sw,x}}{A_{sx}} \tan \alpha}, \\ k_y &= \frac{1}{1 + \frac{2A_{sw,y}}{A_{sy}}}, \end{aligned} \quad (7)$$

В выражениях (6) и (7): $A_{s,x}$ и $A_{s,y}$ - площадь продольной арматуры у горизонтальной и вертикальной грани соответственно; $A_{sw,x}$ и $A_{sw,y}$ - площадь поперечной арматуры у горизонтальной и вертикальной грани соответственно; α - угол наклона трещины на нижней горизонтальной грани; z_x - плечо внутренней пары сил в направлении оси х (направлена вдоль ширины сечения).

Так как несущая способность железобетонной конструкции при изгибе с кручением от кратковременных динамических нагрузок ограничивается работой продольной и поперечной арматуры в стадии до образования пластических деформаций, то необходимо ввести критерий, связывающий напряжения в арматуре с предельным значением. В работе предлагается в качестве такого критерия использовать условие пластичности Губера – Мизеса – Генки (2), согласно которому напряжения в продольной арматуре будут характеризоваться нормальными напряжениями от действия изгибающего момента и двумя касательными напряжениями от действия крутящего момента, а напряжения в поперечной арматуре у горизонтальной и вертикальной грани элемента – нормальными и касательными напряжениями от действия крутящего момента.

С учетом того, что при воздействии на элемент изгибающих и крутящих моментов в продольной арматуре $\sigma_{x,d} = \sigma_{y,d} = \tau_{xy,d} = 0$, выражение (2) преобразуется в вид:

$$\sigma_{z,d}^2 + 3(\tau_{yz,d}^2 + \tau_{zx,d}^2) \leq R_{s,d}^2 \quad (8)$$

где $R_{s,d}$ - расчетный динамический предел текучести продольной арматуры, определяемый умножением статического значения на коэффициент упрочнения арматурной стали.

Выразив касательные напряжения выражения (6) через нормальные напряжения ($\sigma_{z,d}$) и подставив их в (8), получим:

$$\sigma_{z,d} = \sqrt{\frac{R_{s,d}^2}{k'}}, \quad (9)$$

где k' - коэффициент, характеризующий снижение величины напряжений, соответствующих состоянию текучести сложнонапряженной арматуры, определяемый как:

$$k' = 1 + 0,75 \chi^2 k_x^2 + 0,75 \left(\chi \frac{z_y}{z_x} \cdot \frac{A_{s,x}}{A_{s,y}} k_y \right)^2, \quad (10)$$

Предложенный метод расчета железобетонных элементов на изгиб с кручением при кратковременном динамическом нагружении позволяет получить результаты расчета, хорошо согласующиеся с экспериментальными данными (таблица 1.). Сопоставление опытных данных с результатами расчетов показало удовлетворительную сходимость в 5-14% в сторону запаса прочности.

Сравнение результатов расчета с экспериментом

Образец	Эксперимент		СП 63.13330.2012			Методика автора		
	T^3 , кН·м	M^3 , кН·м	T^1 , кН·м	M^1 , кН·м	Δ , %	T^2 , кН·м	M^2 , кН·м	Δ , %
Б1-С1	4,68	11,44	3,54	8,42	24	4,46	10,64	7
Б1-Д1	5,68	13,83	4,18	9,95	27	5,41	12,89	7
Б2-С1	4,94	12,07	3,54	8,42	28	4,46	10,64	12
Б2-Д1	5,80	14,12	4,18	9,95	28	5,41	12,89	9
Б3-С2	5,90	9,25	4,36	6,61	26	5,61	8,79	5
Б3-Д2	7,09	11,04	5,32	8,06	25	6,2	9,76	12
Б4-С2	5,59	8,775	4,36	6,61	20	5,61	8,79	1
Б4-Д2	7,38	11,49	5,32	8,06	28	6,2	9,76	15
Б5-Д2	6,75	10,53	5,32	8,06	21	6,2	9,76	8
Б5-Д3	6,62	12,33	5,03	9,14	24	5,89	10,71	14
Б6-Д1	5,39	13,15	4,18	9,95	22	5,41	12,89	2
Б6-Д3	6,11	11,4	5,03	9,14	18	5,89	10,71	6
Б7-Д1	5,32	12,99	4,18	9,95	21	5,41	12,89	1
Б7-Д3	6,31	11,77	5,03	9,14	21	5,89	10,71	9

Б1...Б7- указание балок-близнецов, изготавливаемых из одной бетонной смеси, в одной опалубке и твердеющих при одних условиях; С1,С2, Д1...Д3 – номер серии в соответствии с рис.1.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

1. На основе анализа и систематизации современных теоретических и экспериментальных исследований определены предельные состояния по прочности железобетонных конструкций, работающих на изгиб с кручением, и способы их нормирования, выявлены особенности и предпосылки расчета указанных конструкций при кратковременном динамическом нагружении.

2. Разработаны программа и методика экспериментальных исследований железобетонных элементов на изгиб с кручением при кратковременном динамическом нагружении, для реализации которых разработаны конструкция испытательного стенда и измерительные устройства,

оригинальность которых подтверждена двумя патентами РФ на изобретение и двумя патентами РФ на полезную модель.

3. Экспериментальные исследования железобетонных элементов на изгиб с кручением при кратковременном динамическом нагружении позволили получить новые опытные данные о напряженно-деформированном состоянии железобетонных конструкций, подверженных одновременному воздействию изгибающих и крутящих моментов. Опытным путем выявлена закономерность трещинообразования во времени и установлено, что разрушение железобетонных элементов при кратковременном динамическом воздействии изгибающих и крутящих моментов происходит по пространственному сечению, при этом угол наклона трещин на нижней грани зависит от величины соотношения крутящего момента к изгибающему (χ): при $\chi=0,4$ угол наклона равен $20^\circ \dots 24^\circ$, при $\chi=0,7 - 27^\circ \dots 31^\circ$.

4. На основе численных исследований методом конечных элементов получены закономерности распределения напряжений в продольной и поперечной арматуре при варьировании характеристик χ , класса бетона, размеров поперечного сечения, процента армирования. Результаты расчетов подтвердили предложенный критерий предельного состояния железобетонных элементов при изгибе с кручением и принятые предпосылки расчета.

5. Предложен метод расчета по прочности железобетонных элементов на изгиб с кручением при кратковременном динамическом нагружении, основанный на теории пластичности Губера-Мизеса-Генки с учетом пространственной расчетной модели В.Н. Байкова, предложенной для статического нагружения, теории совместного деформирования продольной и поперечной арматуры и учете упрочненных характеристик диаграмм деформирования бетона и арматурной стали при кратковременном динамическом нагружении. Результаты расчетов по предложенному методу хорошо согласуются с результатами экспериментальных исследований, расхождение составляет 5-14 % в сторону запаса прочности.

6. Результаты исследований, представленные в работе, а также разработанный метод расчета применен АО «Иркутский Промстройпроект» при проектировании конструкций ригелей перекрытия здания-представителя каркасной универсальной полносборной системы «КУПАСС», что подтверждено справкой о внедрении.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе приведены впервые полученные результаты экспериментальных исследований железобетонных элементов на изгиб с кручением при кратковременном динамическом нагружении. В ходе выполнения физического эксперимента определены несущая способность, характер разрушения, схемы трещинообразования и деформативность железобетонных

элементов, испытывающих изгиб с кручением при кратковременном динамическом нагружении. Полученные результаты исследований позволили предложить метод расчета указанных конструкций, основанный на теории пластичности Губера-Мизеса-Генки и пространственной расчетной модели В.Н. Байкова, предложенной для статического нагружения, теории совместного деформирования продольной и поперечной арматуры и учете упрочненных характеристик диаграмм деформирования бетона и арматурной стали при кратковременном динамическом нагружении. Предложенный метод позволяет достоверно оценить несущую способность железобетонных элементов при изгибе с кручением от кратковременного динамического нагружения, что подтверждено согласованностью результатов расчета с результатами эксперимента.

В качестве **предложений для дальнейшего развития исследований**, представленных в работе, следует отметить разработку методов расчета железобетонных элементов при одновременном воздействии поперечной силы и крутящего момента, а также при одновременном воздействии поперечной силы, изгибающего и крутящего моментов от кратковременного динамического нагружения.

Публикации по теме диссертации

Статьи в журналах, включенных в перечень ВАК

1. **Арзамасцев, С.А.** К расчету железобетонных элементов на изгиб с кручением [Текст] / В.В. Родевич, С.А. Арзамасцев // Известия высших учебных заведений. Строительство. – 2015. – №9. – С. 99–109.
2. **Арзамасцев, С.А.** Экспериментальные исследования железобетонных элементов, работающих на изгиб с кручением, при статическом и кратковременном динамическом воздействиях [Текст] / В.В. Родевич, С.А. Арзамасцев // Жилищное строительство. – 2014. – №10. – С. 15–18.
3. **Арзамасцев, С.А.** К оценке прочности железобетонных изгибаемых элементов при кручении от кратковременных динамических нагрузок [Текст] / В.В. Родевич, С.А. Арзамасцев // Вестник ТГАСУ. – 2017. – № 2 (61). – С. 112-122.

Патенты на изобретения

4. Патент РФ на изобретение № 2578662 МПК G01M 7/00 (2006.01), G01N 3/303 (2006.01), G01N 3/307 (2006.01). Способ испытания строительных конструкций на изгиб с кручением при статическом и кратковременном динамическом воздействии/ Г.И. Однокопылов, В.В. Родевич, **С.А. Арзамасцев**; заявители и патентообладатели ФГБОУ ВПО «ТГАСУ», ООО «СТИ ТДСК» - 2015101043/28 заявл. 12.01.2015; опубл. 27.03.2016 Бюл. №9.
5. Патент РФ на изобретение № 2570231 МПК G01M 7/08 (2006.01), G01N 3/30 (2006.01). Стенд для испытания железобетонных элементов на совместное кратковременное динамическое воздействие изгибающего и крутящего моментов / В.В. Родевич, Г.И. Однокопылов, **С.А. Арзамасцев**; заявители и патентообладатели ФГБОУ ВПО «ТГАСУ», ООО «СТИ ТДСК» - 2014136689/28 заявл. 09.09.2014; опубл. 10.12.2015 Бюл. №34.

6. Патент РФ на полезную модель №162522 МПК G01B 7/16 (2006.01). Тензометрическое устройство. / Г.И. Однокопылов, В.В. Родевич, **С.А. Арзамасцев**; заявители и патентообладатели ФГБОУ ВПО «ТГАСУ», ООО «СТИ ТДСК» -2016104580/28 заявл. 10.02.2016; опубл. 10.06.2016 Бюл. №16.
7. Патент РФ на полезную модель №163140 МПК G01B 7/16 (2006.01). Тензометрическое устройство. / Г.И. Однокопылов, В.В. Родевич, **С.А. Арзамасцев**, И.В. Богатырева; заявители и патентообладатели ФГБОУ ВПО «ТГАСУ», ООО «СТИ ТДСК» -2015142552/28 заявл. 06.10.2015; опубл. 10.07.2016 Бюл. №19.

Статьи в других печатных изданиях

8. **Арзамасцев, С.А.** Экспериментальные исследования однополочных ригелей перекрытия в построечных условиях зданий по системе «КАСКАД» [Текст] / С.А. Арзамасцев, В.А. Матвеев, В.В. Родевич // Строительство энергоэффективного полносборного жилья экономического класса: проблемы и решения: сборник научных трудов под общей ред. С.Н. Овсянникова. – Томск: Изд-во Том. гос. архит.-строит. ун-та, 2014. – С. 34–39
9. **Арзамасцев, С.А.** Исследования железобетонных элементов, подверженных изгибу с кручением, при различных видах нагружения [Текст] / М.С. Бобровский, С.А. Арзамасцев, В.А. Вольховский // Молодежь, наука, технологии: новые идеи и перспективы. Материалы I Международной научной конференции студентов и молодых ученых [Электронный ресурс]. Томск: Изд-во Том. гос. архит.-строит. ун-та, 2014. – С. 5–6.
10. **Арзамасцев, С.А.** Исследования железобетонных элементов, работающих на изгиб с кручением при статическом и кратковременном динамическом воздействии [Текст] / С.А. Арзамасцев, А.Ю. Кудрявцев // Перспективы развития фундаментальных наук [Электронный ресурс]: труды XI Международной конференции студентов и молодых учёных. Россия, Томск, 22–25 апреля 2014 г. / под ред. Е.А. Вайтулевич. – Национальный Исследовательский Томский политехнический университет, 2014. – С. 711–713.
11. **Арзамасцев, С.А.** Экспериментальные и численные исследования железобетонных элементов, работающих на изгиб с кручением [Текст] / В.В. Родевич, С.А. Арзамасцев // Актуальные вопросы технических наук в современных условиях. Сборник научных трудов по итогам международной научно-практической конференции (14 января 2015 г.). Выпуск II. – Санкт-Петербург 2015. – С. 171–175.
12. **Арзамасцев, С.А.** Исследования железобетонных элементов, подверженных изгибу с кручением [Текст] / В.А. Вольховский, С.А. Арзамасцев // Молодежь, наука, технологии: новые идеи и перспективы. Материалы II Международной научной конференции студентов и молодых ученых [Электронный ресурс]. Томск: Изд-во Том. гос. архит.-строит. ун-та, 2015. – С. 29–30.
13. **Арзамасцев, С.А.** Анализ напряженно-деформированного состояния железобетонных элементов, подверженных изгибу с кручением [Текст] / В.А. Вольховский, С.А. Арзамасцев // Перспективы фундаментальных наук [Электронный ресурс]: сборник трудов XII Международной конференции студентов и молодых ученых (Томск, 21–24 апреля 2015 г.) / Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2015. – С. 1193–1195

Подписано в печать 20.10.2017 . Формат 60×84.
Бумага офсет. Гарнитура Таймс. Уч.-изд. л. 1,15.
Тираж 130 экз. Заказ № 233.

Изд-во ФГБОУ ВО «ТГАСУ», 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2.
Отпечатано с оригинал-макета автора в ООП ФГБОУ ВО «ТГАСУ».
634003, г. Томск, ул. Партизанская, 15.