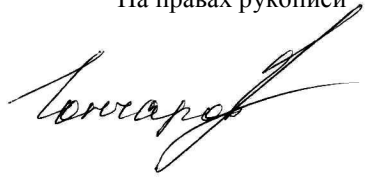


На правах рукописи



ГОНЧАРОВ МАКСИМ ЕВГЕНЬЕВИЧ

**ПРОЧНОСТЬ СТЫКОВ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОЛОНН,
УСИЛЕННЫХ МЕТАЛЛИЧЕСКИМИ ЭЛЕМЕНТАМИ,
ПРИ СТАТИЧЕСКОМ И КРАТКОВРЕМЕННОМ ДИНАМИЧЕСКОМ
НАГРУЖЕНИЯХ**

05.23.01 – Строительные конструкции, здания и сооружения

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Томск – 2015

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

- Научный руководитель:** **Плевков Василий Сергеевич**,
доктор технических наук, профессор.
- Официальные оппоненты:** **Соколов Борис Сергеевич**,
доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой «Железобетонные
и каменные конструкции»
ФГБОУ ВПО «Казанский государственный
архитектурно-строительный университет»,
г. Казань;
- Адищев Владимир Васильевич**,
доктор технических наук, профессор,
декан строительного факультета
ФГБОУ ВПО «Новосибирский
государственный архитектурно-строительный
университет (Сибстрин)»,
г. Новосибирск.
- Ведущая организация:** **ФГБУ «Всероссийский
научно-исследовательский институт
по проблемам гражданской обороны
и чрезвычайных ситуаций» (Федеральный
центр науки и высоких технологий)**,
г. Москва.

Защита состоится 10 апреля 2015 г. в 14.00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.265.01 при ФГБОУ ВПО «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 «17» февраля 2015 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Копаница Н.О.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. В последнее время вопросы реконструкции зданий и сооружений, связанные с переоборудованием и изменением их функционального назначения, приводящие к появлению или значительному увеличению статических и динамических нагрузок являются по-прежнему актуальными. Увеличению параметров действующих усилий в несущих железобетонных конструкциях и их стыках для каркасных зданий и сооружений также способствуют изменения в современной нормативной базе.

Анализ конструктивных решений стыков сборных железобетонных колонн каркасных зданий показал, что широкое распространение получил стык колонн, выполняемый с ванной сваркой продольных стержней. Данные стыки очень чувствительны к технологическим, конструктивным и другим отступлениям, что может привести к отказу отдельных несущих железобетонных конструкций или зданий в целом с повреждениями дорогостоящего оборудования, травмами и даже гибелью людей.

Имеющиеся на сегодняшний день теоретические и экспериментальные исследования работы стыков железобетонных колонн в основном проводились для статических нагружений. Исследований стыков железобетонных колонн при действии кратковременных динамических нагрузок крайне недостаточно.

Таким образом, решение вопросов по расчету прочности и деформативности стыков железобетонных колонн, усиленных металлическими обоймами, является актуальным и имеет важное практическое значение при проектировании и реконструкции зданий и сооружений.

Работа выполнялась в рамках: 1-й аналитической ведомственной целевой программы Министерства образования и науки РФ «Развитие научного потенциала высшей школы на 2007–2011 г.г. по теме № 1.2.07 «Совершенствование теории расчета сжатых, сжатоизогнутых железобетонных конструкций, форм их колебаний, уточнение математической модели грунтов основания»; государственного заказа Министерства образования и науки РФ в 2014–2016 г.г. «Проведение научно-исследовательских работ (фундаментальных научных исследований, прикладных научных исследований и экспериментальных разработок)» по теме № 458 «Развитие теории расчета и проектирования сооружений минимальной материалоемкости».

Объектом исследования являются стыки симметрично армированных железобетонных колонн прямоугольного сечения.

Предметом исследования являются методы расчета силового сопротивления по прочности и деформативности стыков железобетонных колонн, усиленных металлическими обоймами, при статическом и кратковременном динамическом нагружениях.

Цель работы. Разработка, реализация и экспериментальная проверка метода расчета по прочности стыков железобетонных колонн, усиленных ме-

таллическими элементами, при статическом и кратковременном динамическом нагружениях.

Задачи исследования:

- на основе обзора, систематизации и анализа современных теоретических и экспериментальных данных определить предельные состояния и способы их нормирования, а также предпосылки расчета стыков сборных железобетонных колонн при статическом и кратковременном динамическом нагружениях с учетом нелинейной работы бетона и арматуры;
- провести экспериментальные исследования стыков сборных железобетонных колонн, без усиления и усиленных металлическими элементами, при статическом и кратковременном динамическом нагружениях;
- выполнить численные расчеты методом конечных элементов в трехмерной постановке стыков сборных железобетонных колонн при статическом и кратковременном динамическом нагружениях;
- предложить метод расчета стыков сборных железобетонных колонн при статическом и кратковременном динамическом нагружениях с учетом нелинейной работы бетона и арматуры, разработать алгоритм и программу расчета;
- проанализировать и сопоставить результаты расчетов по предложенному методу с данными экспериментальных исследований стыков железобетонных колонн, без усиления и усиленных металлическими элементами, при статическом и кратковременном динамическом нагружениях.

Методология работы. Поставленные задачи решены в ходе теоретических и экспериментальных исследований, основанных на фундаментальных положениях в области железобетона. Физический эксперимент проведен в лицензированном испытательном центре «СТРОМТЕСТ» Томского государственного архитектурно-строительного университета с использованием оригинальных измерительных приборов и стендов, что обеспечило необходимую достоверность полученных результатов.

Научная новизна работы заключается в получении новых знаний о работе стыков железобетонных колонн при действии статических и кратковременных динамических нагрузок, а именно:

- разработаны и экспериментально проверены аналитические зависимости расчета по предельным усилиям прочности стыков сборных железобетонных колонн при кратковременном динамическом нагружении, которые основаны на теории сопротивления анизотропных материалов сжатию и пространственной модели разрушения стыков, предложенной для статически нагруженных колонн профессором Соколовым Б.С.;
- получены новые результаты расчетов по деформированию, трещинообразованию и разрушению стыков железобетонных колонн при кратковременном динамическом нагружении, которые показали удовлетворительную сходимость с результатами экспериментальных исследований;

– показано, что разработанный метод расчета по прочности железобетонных колонн и их стыков, основанный на нелинейной деформационной модели, позволяет выполнить расчет колонн и стыков при любом сочетании продольных сил и изгибающих моментов от статических и кратковременных динамических воздействий;

– получены новые экспериментальные данные о напряженно-деформированном состоянии и деформативности стыков железобетонных колонн, усиленных металлическими элементами, характеризующиеся особенностями включения в работу элементов усиления в зависимости от конструктивного решения усиления.

Практическая значимость работы заключается в получении научно обоснованных результатов для разработки метода расчета по прочности стыков железобетонных колонн, усиленных металлическими элементами, при статическом и кратковременном динамическом воздействиях; в создании программного продукта, позволяющего значительно упростить и сократить сроки решения задач прямого и обратного проектирования железобетонных колонн и их стыков; в разработке программы и методики экспериментальных исследований стыков железобетонных колонн, усиленных металлическими элементами, при кратковременном динамическом воздействии; а также в предложении усиления стыков колонн металлической обоймой в виде П-образных стержней и инженерного метода его расчета.

Достоверность результатов работы. Достоверность полученных результатов обеспечивается корректным использованием основных положений теории железобетона; расчетными предпосылками, основанными на анализе обширных экспериментальных данных о поведении материалов и конструкций при статическом и кратковременном динамическом нагружении; методологически обоснованным комплексом экспериментальных исследований с применением сертифицированных лабораторных приборов и установок; применением современных средств регистрации исследуемых параметров, достаточной воспроизводимостью экспериментальных величин. Точность метода расчета стыков железобетонных колонн, усиленных металлическими обоймами, подтверждена удовлетворительной сходимостью теоретических и экспериментальных данных.

Реализация работы. Полученные результаты теоретических и экспериментальных исследований прочности стыков железобетонных колонн были использованы при разработке проекта усиления железобетонного каркаса кардиологического центра в г. Кемерово в связи с разрушением стыков железобетонных колонн. Разработанный программный продукт «JBK-DM-Styk», предназначенный для расчета железобетонных колонн и их стыков при кратковременном динамическом нагружении, прошел апробацию в ФГБУ «Всероссийский научно-исследовательский институт по проблемам гражданской обороны и чрезвычайных ситуаций» (Федеральный центр науки и высоких технологий) и используется при расчетах железобетонных конструкций

зданий специального назначения. Результаты исследований включены в специальный курс и лабораторные работы на кафедре «Железобетонные и каменные конструкции» ФГБОУ ВПО «Томский государственный архитектурно-строительный университет» при подготовке бакалавров, специалистов и магистров по направлению 270100 «Строительство», что подтверждено справками о внедрении, приведенными в приложении 3 диссертации.

Личный вклад диссертанта состоит:

- в разработке методики и проведении экспериментальных исследований стыков железобетонных колонн, усиленных металлическими элементами, при статическом и кратковременном динамическом нагружениях;
- в выполнении аналитических и численных расчетов стыков железобетонных колонн, усиленных металлическими элементами, при статическом и кратковременном динамическом нагружениях;
- в разработке алгоритма и программы расчета железобетонных колонн и их стыков при статических и кратковременных динамических воздействиях;
- в разработке усиления стыка железобетонных колонн металлической обоймы в виде П-образных стержней и инженерного метода расчета данного усиления.

На защиту выносятся:

- расчетные модели силового сопротивления стыков железобетонных колонн по прочности от статических и кратковременных динамических воздействий, реализующие деформационную модель и нелинейную работу бетона и арматуры;
- результаты численных исследований методом конечных элементов в трехмерной постановке деформативности, трещинообразования и прочности стыков железобетонных колонн, без усиления и усиленных металлическими элементами, при статическом и кратковременном динамическом нагружениях;
- методика и результаты экспериментальных исследований стыков железобетонных колонн, без усиления и усиленных металлическими элементами, при статическом и кратковременном динамическом нагружениях;
- усиление стыков железобетонных колонн металлической обоймы в виде П-образных стержней и инженерный метод его расчета.

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы докладывались на научных семинарах кафедры «Железобетонные и каменные конструкции» Томского государственного архитектурно-строительного университета (2009–2014 г.г.); на VIII Академических чтениях РААСН «Международная научно-техническая конференция “Механика разрушения строительных материалов и конструкций”» (г. Казань, 18–20 сентября 2014 г.); на VI, VII, IX и XI международных конференциях студентов и молодых ученых «Перспективы развития фундаментальных наук» (г. Томск, 2009 г., 2010 г., 2012 г., 2014 г., ТПУ); на II Всероссийской конференции «Актуальные про-

блемы строительной отрасли» (66-я научно-техническая конференция НГАСУ (Сибстрин), 2009 г., г. Новосибирск); на 12-й Сибирской (международной) конференции по железобетону «Научные труды Общества железобетонщиков Сибири и Урала» (4 февраля 2010 г., г. Новосибирск). В полном объеме работа доложена и одобрена на совместном научном семинаре кафедр ФГБОУ ВПО ТГАСУ (г. Томск, сентябрь 2014 г.) и на совместном научном семинаре кафедр ФГБОУ ВПО НГАСУ (Сибстрин) (г. Новосибирск, октябрь 2014 г.).

Публикации. По материалам диссертации опубликовано 18 печатных работ, включая пять статей, опубликованных в журналах, входящих в перечень изданий, рекомендованных ВАК, 2 патента РФ на изобретение и 1 патент РФ на полезную модель.

Объем и структура работы. Диссертация объемом 206 страниц машинописного текста состоит из введения, четырех глав, основных выводов, списка литературы из 198 наименований, трех приложений и содержит 3 таблицы, 76 рисунков.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность темы диссертации, дается общая характеристика работы, формулируются цель и задачи исследования, описываются объект и предмет исследования, методология, научная новизна и практическая значимость работы, достоверность и внедрение результатов исследования, апробация, публикации, объем и структура работы.

В первой главе проведен обзор теоретических и экспериментальных исследований стыков железобетонных колонн, при этом отмечена недостаточность указанных исследований по кратковременным динамическим нагрузениям.

Анализ приведенных в работе различных конструктивных решений стыков сборных железобетонных колонн показал, что наиболее частое применение получил стык, выполняемый ванной сваркой продольных стержней, для многоэтажных каркасных зданий и сооружений рамной, рамно-связевой и связевой систем, наиболее часто встречающихся при их реконструкции с изменением функционального назначения и действующих нагрузок.

Исследованию стыков сборных железобетонных колонн при статическом нагружении посвящены работы Васильева А.П., Горшковой В.М., Гусакова В.Н., Иванова В.В., Кваши В.Г., Коровина Н.Н., Крицмана Ю.Л., Крылова С.М., Кудрявцева А.А., Латыпова Р.Р., Левича В.В., Литвинова Л.Н., Малышева В.П., Маткова Н.Г., Никитина Г.П., Родичкина Е.Г., Соколова Б.С., Эпп А и др.

Результаты обследований многоэтажных каркасных зданий и выполненные расчеты пространственных систем данных зданий (на примере 14-этажного здания Кардиологического центра и 21-этажного здания гостиницы «Кристалл» в г. Кемерово, 9-этажного здания главного корпуса городской многопрофильной больницы в г. Междуреченске и др.) показали, что

стыки сборных железобетонных колонн, выполненные с применением ванной сварки продольных стержней, чувствительны к технологическим, конструктивным и другим дефектам, приводящим к снижению несущей способности или даже разрушению конструкции. Допущенные дефекты, как правило, требуют дополнительного расчета стыков сборных железобетонных колонн при различных сочетаниях действующих продольных сил и изгибающих моментов с возможным дальнейшим усилением стыка.

Анализ результатов обследований и выполненных расчетов позволили предложить классификацию причин, вызывающих необходимость усиления железобетонных колонн и их стыков, которые включают: ошибки при проектировании, изготовлении, транспортировке, монтаже; реконструкцию с изменением функционального назначения здания; различные повреждения, полученные в результате нарушений правил эксплуатации и др.

В работе приведена классификация способов усиления железобетонных колонн и их стыков, включающая: увеличение несущей способности без изменения расчетной схемы, разгрузка конструкции, специальные варианты усиления и др. При этом наиболее широкое распространение получил способ усиления в виде металлической обоймы.

Показано, что существующие исследования и методы расчета стыков сборных железобетонных колонн с усилением металлическими элементами рассмотрены в основном при статическом воздействии; при кратковременном динамическом нагружении таких исследований выполнено крайне мало.

На основе проведенного анализа состояния вопроса сформулированы основные направления исследований.

Вторая глава посвящена предпосылкам расчета сборных железобетонных колонн и их стыков, без усиления и усиленных металлическими элементами, а также их численным расчетам методом конечных элементов в трехмерной постановке при кратковременном динамическом и статическом нагружениях.

В работе сформулированы предельные состояния и способы их нормирования в абсолютных и относительных величинах параметров, используемых при расчетах сборных железобетонных колонн и их стыков. При этом прочность стыков сборных железобетонных колонн принимается минимальной при рассмотрении трех расчетных сечений по высоте стыка:

– в первом сечении, проходящем в уровне центрирующей прокладки, результирующая несущая способность определяется усилиями, воспринимаемыми: центрирующей прокладкой; раствором, которым зачеканивается зазор между торцами колонн; бетоном замоноличивания подрезок; продольной арматурой;

– во втором сечении, проходящем в уровне подрезок, результирующая несущая способность определяется усилиями, воспринимаемыми: бетонным выступом колонны с учетом сеток косвенного армирования; бетоном замоноличивания подрезок; продольной арматурой;

– в третьем сечении, проходящем по телу колонны на участке установки сеток косвенного армирования, результирующая несущая способность определяется усилиями, воспринимаемыми: бетоном колонны с учетом сеток косвенного армирования; продольной арматурой.

При этом несущая способность стыков сборных железобетонных колонн для рассматриваемых сечений должна быть выше несущей способности сечения колонны вне стыка.

Физической основой развития методов расчета железобетонных колонн и их стыков при статическом и кратковременном динамическом нагружениях являются действительные нелинейные диаграммы деформирования бетона и арматуры. По сравнению со статическим нагружением бетона и арматуры, кратковременные динамические воздействия приводят к изменению их прочностных и деформативных характеристик. Для аналитического описания нелинейных диаграмм бетона и арматуры различными авторами 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 приняты кусочно-линейные диаграммы деформирования бетона и арматуры, основные параметрические точки которых изменяются во времени деформирования по логарифмическим зависимостям, предложенным Баженовым Ю.М. и Поповым Г.И.

Над созданием и развитием методов расчета железобетонных конструкций при действии кратковременных динамических нагрузок работали такие ученые, как: Белов Н.Н., Бондаренко В.М., Гвоздев А.А., Жарницкий В.И., Забегаев А.В., Кириллов А.П., Копаница Д.Г., Котляревский В.А., Кумпяк О.Г., Плевков В.С., Попов Г.И., Попов Н.Н., Рабинович И.М., Радченко А.В., Расторгуев Б.С., Рыков Г.В., Саргсян А.Е., Сеницын А.П., Ставров Г.Н., Тамразян А.Г., Тонких Г.П., Трекин Н.Н. и другие.

В работе приводятся результаты численных исследований прочности, деформативности и трещинообразования стыков сборных железобетонных колонн, экспериментальные исследования которых при кратковременном динамическом нагружении выполнены автором на копровой установке.

Расчеты выполнены в трехмерной волновой динамической постановке с использованием программы «Dynamec 3D», при этом варьировались критерии прочности материалов, наличие или отсутствие стыка, конструктивные решения стыков железобетонных колонн и другие параметры. Расчетная схема стыков сборных железобетонных колонн состоит из более чем одного миллиона объемных элементов в виде тетраэдров. При этом кратковременные динамические воздействия принимались аналогичными экспериментальным исследованиям колонн.

Численные исследования динамического нагружения сжатых железобетонных колонн и их стыков позволили получить новые данные по деформированию бетона и арматуры во всем диапазоне нагружения с учетом волно-

вых процессов. Полученные схемы трещинообразования и разрушения показали качественное совпадение с результатами экспериментальных исследований (рисунок 1, а, б). При этом были выявлены повышенные поперечные деформации в уровне стыка колонн (рисунок 1, в).

Численные исследования работы стыков железобетонных колонн с применением программы «Dynamic 3D» при удовлетворительной сходимости результатов расчетов с экспериментальными данными показали трудоемкость данных расчетов и сложность решения задач по определению требуемого армирования конструкции.

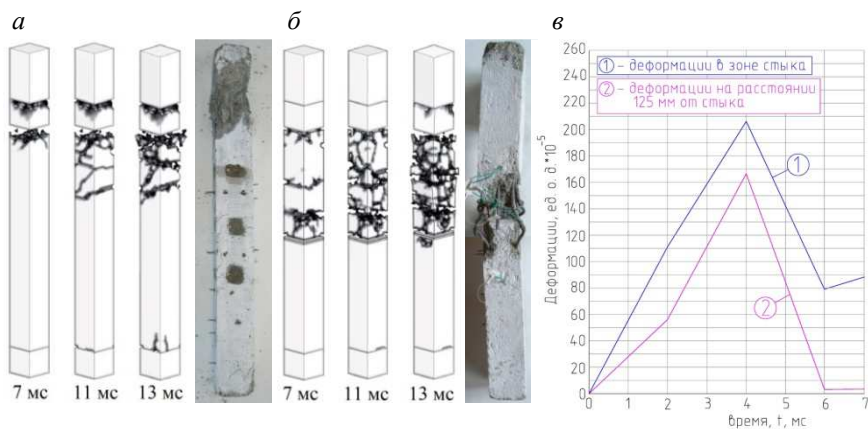


Рисунок 1 – Деформирование, схемы трещинообразования и разрушения железобетонных колонн при динамическом нагружении по результатам численных расчетов и экспериментальных исследований (а – для колонны без стыка; б – для стыка колонн без усиления) и график зависимости поперечных деформаций бетона в уровне стыка в период динамического нагружения (в)

В работе приведены численные исследования для стыков натуральных железобетонных колонн с усилениями различными металлическими обоймами. В программе численных исследований с применением программных комплексов «SCAD» и «Ли́ра» варьировались различные параметры: наличие или отсутствие металлической обоймы и ее вид, наличие или отсутствие сеток в стыке колонн; класс бетона замоноличивания подрезок и другие параметры (рисунок 2, а–г). Расчеты на действие статической нагрузки в ПК «Ли́ра» выполнены с учетом физической нелинейности материалов.

Результаты расчета позволили выявить особенности работы стыков железобетонных колонн, усиленных различными металлическими обоймами в виде уголков и планок, П-образных стержней различного диаметра, установленных с различным шагом. При этом показано наличие повышенных попе-

речных деформаций в уровне стыка, которые уменьшаются по мере удаления от него по высоте (рисунок 2, д). При сопоставлении продольных деформаций с экспериментальными значениями, отмечено совпадение результатов на начальных этапах нагружения и расхождение при приближении к разрушающей нагрузке.

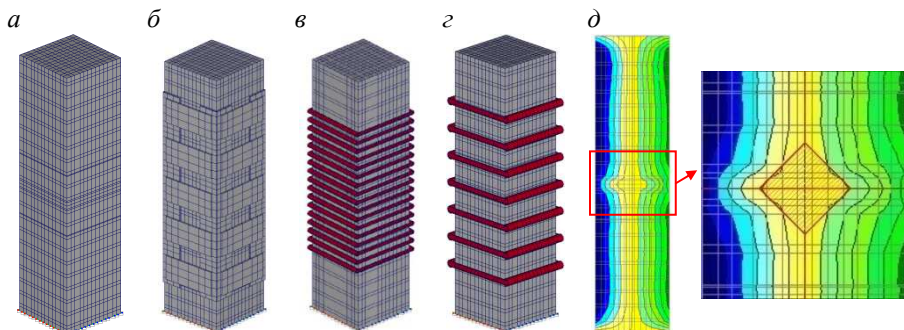


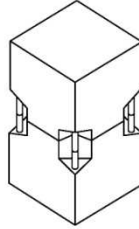
Рисунок 2 – Расчетные схемы стыков натуральных фрагментов колонн с усилением и без усиления (*а* – без усиления; *б* – с усилением в виде металлической обоймы из продольных уголков и поперечных планок; *в*, *з* – с усилением в виде металлической обоймы из П-образных стержней) и поперечных деформаций в уровне стыка (*д*)

В третьей главе приведены результаты экспериментальных исследований работы стыков железобетонных колонн при статическом и кратковременном динамическом нагружениях.

Для определения предпосылок расчета по прочности железобетонных колонн и их стыков, а также верификации предложенных методов расчета были проведены экспериментальные исследования 6 натуральных фрагментов стыков железобетонных колонн при статическом и 15 железобетонных колонн при кратковременном динамическом нагружениях, в которых варьировались геометрические параметры элементов, наличие или отсутствие стыка, металлической обоймы усиления и ее вида, а также сеток косвенного армирования в зоне стыка. Программа экспериментальных исследований приведена на рисунке 3.

Для испытания на статическое нагружение натурные фрагменты были выполнены одинаковым сечением 400×400 мм и длиной 1600 мм. При этом приняты 2 образца без усиления (СК-1, СК-2); 2 образца, усиленных металлической обоймой в виде уголков и предварительно напряженных планок (СКМ-1, СКМ-2); а так же 2 образца, усиленных металлической обоймой в виде П-образных стержней из арматуры класса А400 (А-III): диаметром 20 мм, с шагом 55 мм (СКМ-3) и диаметром 32 мм, с шагом 165 мм (СКМ-4).

Стыки железобетонных колонн

Натурные образцы стыков
колонн сечением 400×400 ммСтыки колонн сечением
100×100 мм

Статическое нагружение			Кратковременное динамическое нагружение		
№ пп	Маркировка	Характеристики	№ пп	Маркировка	Характеристики
1	СК-1	Стык железобетонных колонн без усиления	1	К _д -1-1	Железобетонная колонна без стыка (исходный образец)
2	СК-2		2	К _д -2-1	
3	СКМ-1	Стык железобетонных колонн, усиленный обоймой в виде металлических уголков и планок, установленных с шагом 250 мм	3	СК _д -1-1	Стык железобетонных колонн (без дефектов и усиления)
			4	СК _д -1-2	
			5	СК _д -2-1	
			6	СК _д -3-1	
4	СКМ-2	Стык железобетонных колонн, усиленный обоймой в виде металлических уголков и планок, установленных с шагом 300-370 мм	7	СКД _д -2-1	Стык железобетонных колонн, имеющий дефекты изготовления (отсутствие косвенного армирования в виде сеток в зоне стыка) и не имеющий усиления обоймой
			8	СКД _д -3-1	
			9	СКД _д -3-2	
5	СКМ-3	Стык железобетонных колонн, усиленный обоймой в виде П-образных стержней диаметром 20 мм класса А400 (А-III), установленных с шагом 55 мм	10	СКМ _д -1-1	Стык железобетонных колонн, усиленный металлической обоймой и не имеющий дефектов изготовления
			11	СКМ _д -1-2	
			12	СКМ _д -2-1	
			13	СКМ _д -3-1	
6	СКМ-4	Стык железобетонных колонн, усиленный обоймой в виде П-образных стержней диаметром 32 мм класса А400 (А-III), установленных с шагом 165 мм	14	СКМД _д -2-1	Стык железобетонных колонн, имеющий дефекты изготовления (отсутствие косвенного армирования в виде сеток в зоне стыка) и усиленный металлической обоймой
			15	СКМД _д -3-1	

Экспериментальные образцы стыков железобетонных колонн

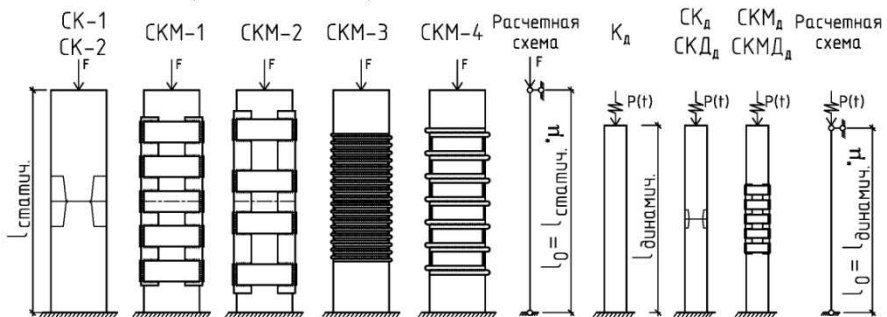


Рисунок 3 – Программа экспериментальных исследований

Все шесть натуральных фрагментов армировались одинаковой продольной ($4\varnothing 28$ А400 (А-III)) и поперечной (хомуты и сетки) арматурой. Сетки косвенного армирования изготовлены из арматуры диаметром 10 мм класса А400 (А-III) с ячейкой 70×70 мм и установлены с шагом по высоте 80 мм. Стыки фрагментов натуральных колонн изготавливались в производственных условиях и повторяли технологический цикл изготовления реальных железобетонных конструкций.

Для проведения экспериментальных исследований на кратковременное динамическое нагружение железобетонные колонны имели сечение 100×100 мм и длину 1000 мм со стыком или без него. При этом принята следующая маркировка экспериментальных колонн: K_d – колонна без стыка; $СК_d$ – колонна со стыком, при наличии сеток в уровне стыка; $СКД_d$ – колонна со стыком, без сеток в уровне стыка; $СКМ_d$ – колонна со стыком, при наличии сеток в уровне стыка и усиленном металлической обоймой; $СКМД_d$ – колонна со стыком без сеток в уровне стыка и усиленном металлической обоймой. Все экспериментальные конструкции при испытании на кратковременное динамическое нагружение армировались пространственными вязаными каркасами. Рабочая продольная арматура была выполнена в виде 8 стержней диаметром 8 мм класса А400 (А-III). Косвенное армирование (хомуты и сетки) выполнено из проволоки В500 (Вр-I) диаметром 3 мм. Для предотвращения локальных разрушений в верхней и нижней приопорных зонах устанавливается косвенное армирование в виде 5 сеток с шагом 20 мм. В зоне стыка железобетонных колонн без дефекта ($СК_d$, $СКД_d$) было установлено пять сеток с шагом 20 мм. При стыке колонн с дефектом ($СКД_d$, $СКМД_d$) сетки в зоне стыка отсутствовали.

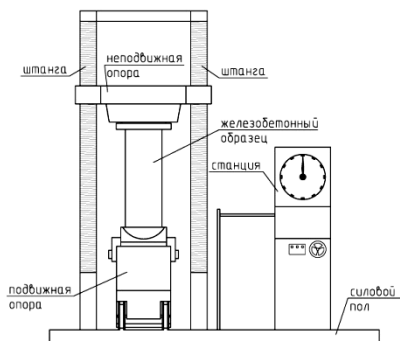
При испытании стыков натуральных фрагментов сборных железобетонных колонн на статическую нагрузку использовался гидравлический пресс ПР-1000 с максимальным усилием в 10000 кН, на кратковременную динамическую нагрузку – специально разработанный стенд на основе копровой установки (рисунок 4). На разработанные оригинальные конструктивные решения стенда для испытания железобетонных элементов на кратковременное динамическое сжатие с демпфером повышенной живучести получены патенты РФ.

Для получения, сбора и анализа необходимых данных о работе стыков сборных железобетонных колонн, без усиления и усиленных металлическими элементами, при статическом и кратковременном динамическом нагружении использовались разработанная методика проведения экспериментальных исследований, поверенные и оттарированные измерительные приборы и устройства совместно с регистрирующими комплексами МИС-300, МИС-400.

В результате экспериментальных исследований стыков железобетонных колонн были получены схемы трещинообразования и разрушения стыков при статическом и кратковременном динамическом нагружениях, при этом выявлены повышенные поперечные деформации бетона в зоне стыка, которые

уменьшаются по мере удаления точки измерения по высоте от стыка (рисунок 5), а также определены величины разрушающих нагрузок для экспериментальных образцов (таблица 1).

а



б

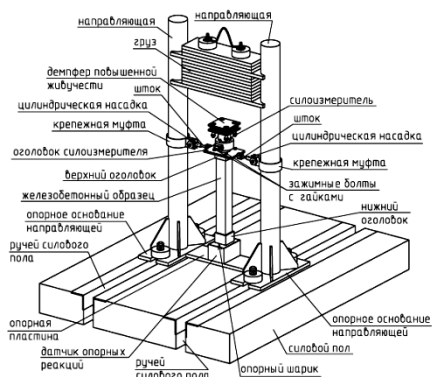


Рисунок 4 – Стенды для испытания железобетонных колонн и их стыков на статическую (а) и кратковременную динамическую (б) нагрузку

Таблица 1 – Величины разрушающих нагрузок экспериментальных образцов

При статическом нагружении						
Маркировка образца	СК-1	СКМ-1	СКМ-2	СКМ-3	СКМ-4	
Разрушающая нагрузка, кН	6000	8500	8000	9180	7800	
При кратковременном динамическом нагружении						
Маркировка образца	К _д	СК _д -2-1	СК _д -3-1	СКД _д	СКМ _д	СКМД _д
Разрушающая нагрузка, кН	215,0	253,0	227,3	194,4	371,6	326,5

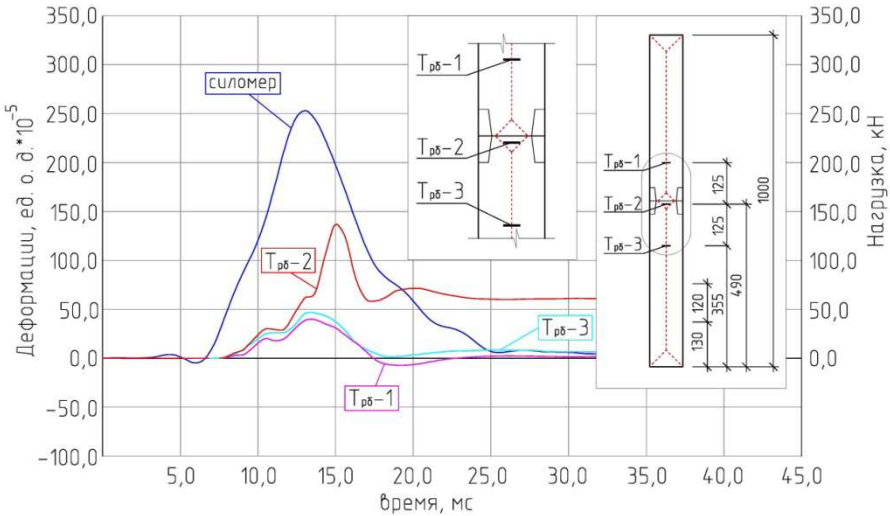


Рисунок 5 – График зависимости поперечных деформаций бетона от времени в уровне стыка экспериментальной конструкции СК_д

Экспериментальные исследования стыков железобетонных колонн позволили получить новые опытные данные о включении в работу элементов металлических обойм усиления. При этом было выявлено, что поперечные планки усиления не включаются в работу на первых этапах загрузки конструкции в отличие от П-образных стержней усиления.

Схемы разрушения экспериментальных образцов при действии статических и кратковременных динамических нагрузок приведены на рисунке 6.

В результате экспериментальных исследований было получено, что несущая способность стыков железобетонных колонн, усиленных металлическими обоймами, возрастает в 1,3–1,4 раза при статическом и более чем в 1,5 раза при кратковременном динамическом нагружении.

Четвертая глава посвящена расчетам прочности стыков сборных железобетонных колонн на действие динамических нагрузок по предельным усилиям.

В работе, на основе полученных экспериментальных данных о повышенной деформативности стыков железобетонных колонн с разрушением за счет внедрения в тело колонны образующегося клина, разработаны и экспериментально проверены аналитические зависимости расчета по предельным усилиям прочности стыков сборных железобетонных колонн при кратковременном динамическом нагружении. Данные зависимости основаны на теории сопротивления анизотропных материалов сжатию и пространственной модели разрушения стыков, предложенной профессором Соколовым Б.С. для статически нагруженных колонн.



Рисунок 6 – Схемы разрушения экспериментальных образцов при действии статической (*a* – образец СК-1; *б* – образец СКМ-1; *в* – образец СКМ-2; *г* – образец СКМ-3; *д* – образец СКМ-4-1) и кратковременной динамической (*e* – образец СКД_д-3-1; *ж* – образец СКМ_д-3-1; *з* – образец СКМД_д-3-1) нагрузок

С использованием полученных аналитических зависимостей были выполнены расчеты по оценке прочности стыков железобетонных колонн, в которых варьировались: класс бетона колонн, геометрические параметры конструкции, размеры центрирующей прокладки квадратной формы и угол наклона боковых граней пространственной модели разрушения стыков. На основании выполненных расчетов были получены как общие усилия $N_{ult,d}$, воспринимаемые сечением стыка колонн, так и отдельные их составляющие: усилия отрыва $N_{bt,d}$, сдвига $N_{sh,d}$ и раздавливания $N_{ef,d}$, зависящие от вышеперечисленных параметров (рисунок 7).

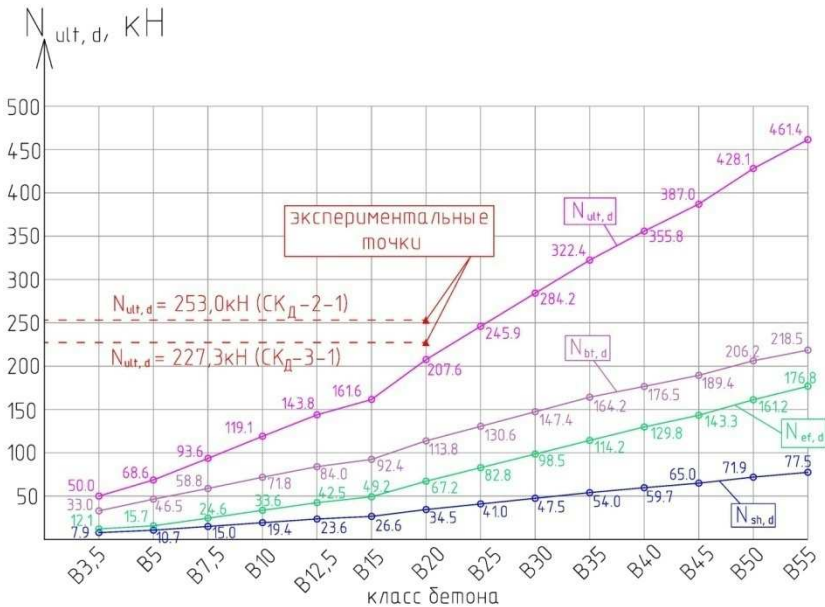


Рисунок 7 - Зависимость несущей способности стыка железобетонных колонн от класса бетона

Из графиков, приведенных на рисунке 7, видно, что разрушающие динамические нагрузки, полученные при экспериментальных исследованиях колонн со стыком СК_д-2-1 ($N_{ult,d} = 253,0$ кН) и СК_д-3-1 ($N_{ult,d} = 227,3$ кН), превышают динамическую нагрузку, полученную по результатам аналитических расчетов, ($N_{ult,d} = 207,6$ кН) на 9,5 % и 21,9 %, что подтверждает корректность предложенного метода расчета стыков сборных железобетонных колонн при кратковременном динамическом нагружении.

Метод расчета по предельным усилиям на действие кратковременных динамических нагрузок применим для зданий со связевыми системами, где колонны каркаса рассчитаны только на действие вертикальных нагрузок, а все горизонтальные нагрузки передаются на систему продольных и поперечных диафрагм жесткости. Для зданий, выполненных по рамной схеме, все вертикальные и горизонтальные нагрузки воспринимаются поперечными или продольными рамами каркаса, что обуславливает появление в колоннах каркаса и их стыках не только продольных усилий, но и изгибающих моментов.

Для таких случаев в рамках диссертационной работы был предложен общий метод расчета железобетонных колонн и их стыков с использованием поверхностной относительной прочности железобетонных элементов при одновременном действии изгибающих моментов в двух плоскостях $M_{x,i}$, $M_{y,i}$ и продольных сил N_i от статических и динамических нагружений, реализующий деформационную модель и учитывающий нелинейные диаграммы де-

формирования бетона и арматуры. Нелинейная деформационная модель базируется на применении уравнений равновесия внутренних усилий в сечении элемента и внешних сил от действующих нагрузок. Обобщенные внутренние усилия определяют путем численного интегрирования напряжений в нормальном сечении (используются эпюры напряжений в бетоне). Рассчитываемое нормальное сечение железобетонной колонны и ее стыка по высоте условно разбивают на малые участки, в пределах высоты которых напряжения считаются равномерными, то есть усредненными.

При расчете железобетонных колонн со стыками рассматривались четыре нормальных сечения: в стыке колонн в уровне центрирующей прокладки; в стыке колонн в зоне с подрезками; по телу колонны в зоне с косвенным армированием выше или ниже стыка; по телу колонны выше или ниже стыка в зоне без косвенного армирования. При этом несущая способность стыка определяется по минимальной несущей способности сечений в стыке колонн, а несущая способность в стыке должна быть выше несущей способности в сечении по телу колонны.

Условия прочности железобетонных колонн и их стыков при расчете представлены в относительных величинах:

– для сечения в уровне тела колонны

$$\begin{aligned}\alpha_n(t) &\leq \alpha_{n,ult}^{col} = \alpha_{nb}^{col} + \alpha_{ns}; \\ \alpha_{mx}(t) &\leq \alpha_{mx,ult}^{col} = \alpha_{mbx}^{col} + \alpha_{msx}; \\ \alpha_{my}(t) &\leq \alpha_{my,ult}^{col} = \alpha_{mby}^{col} + \alpha_{msy};\end{aligned}\quad (1)$$

– для сечения в уровне стыка колонн

$$\begin{aligned}\alpha_n(t) &\leq \alpha_{n,ult}^{joint} = \alpha_{nb}^{col} + \alpha_{nb}^{podr} + \alpha_{ns}; \\ \alpha_{m,x}(t) &\leq \alpha_{mx,ult}^{joint} = \alpha_{mbx}^{col} + \alpha_{mbx}^{podr} + \alpha_{msx}; \\ \alpha_{m,y}(t) &\leq \alpha_{my,ult}^{joint} = \alpha_{mby}^{col} + \alpha_{mby}^{podr} + \alpha_{msy}.\end{aligned}\quad (2)$$

где $\alpha_n(t)$, $\alpha_{mx}(t)$, $\alpha_{my}(t)$ – относительные действующие продольная сила и моменты в двух плоскостях соответственно,

$\alpha_{n,ult}^{col}$, $\alpha_{mx,ult}^{col}$, $\alpha_{my,ult}^{col}$ – суммарные относительная продольная сила и относительные изгибающие моменты в двух плоскостях, воспринимаемые сечением в уровне тела колонны;

$\alpha_{n,ult}^{joint}$, $\alpha_{mx,ult}^{joint}$, $\alpha_{my,ult}^{joint}$ – суммарные относительная продольная сила и относительные изгибающие моменты в двух плоскостях, воспринимаемые сечением в уровне подрезок;

α_{nb}^{col} , α_{mbx}^{col} , α_{mby}^{col} – относительная продольная сила и относительные изгибающие моменты в двух плоскостях, воспринимаемые бетоном колонны;

α_{nb}^{podr} , α_{mbx}^{podr} , α_{mby}^{podr} – относительная продольная сила и относительные изгибающие моменты в двух плоскостях, воспринимаемые бетоном замоноличивания подрезок;

α_{ns} , α_{msx} , α_{msy} – относительная продольная сила и относительные изгибающие моменты в двух плоскостях, воспринимаемые продольной арматурой колонны.

При этом прочностные характеристики бетона принимаются с учетом установленного косвенного армирования.

Используя приведенные выше зависимости, в работе построены в пространстве координат α_n , α_{mx} , α_{my} выпуклые замкнутые поверхности прочности нормального сечения железобетонных колонн и их стыков, которые позволяют оценить их прочность при любом сочетании продольных сил и изгибающих моментов.

Расчет нормальных сечений железобетонных колонн и их стыков на основе нелинейной деформационной модели связан с большим объемом вычислений, и его реализация возможна при помощи специализированных компьютерных программ. В связи с этим был составлен алгоритм и разработана программа «JBK-DM-Styk» расчета железобетонных колонн и их стыков при статическом и кратковременном динамическом нагружении на основе нелинейной деформационной модели. Расчет железобетонных колонн и их стыков с использованием программы «JBK-DM-Styk» производится по четырем сечениям, рассмотренным выше, а несущая способность стыка определяется по минимальной несущей способности рассматриваемых сечений.

Программа «JBK-DM-Styk» позволяет решать задачи прямого и обратного проектирования стыков железобетонных колонн при статическом и кратковременном динамическом действии продольных сил и изгибающих моментов, а также в графическом виде наглядно представить результаты расчетов и выявить запасы прочности конструкции стыка.

Сопоставление результатов расчетов по программе «JBK-DM-Styk» с результатами экспериментальных исследований показало их удовлетворительную сходимость в 7–15 % в сторону запаса прочности.

В диссертационной работе предложен новый вид усиления железобетонных колонн и их стыков металлической обоймой в виде П-образных стержней и инженерный метод его расчета, новизна которых подтверждена патентом РФ на изобретение. Для предложенного варианта усиления стыков железобетонных колонн были получены аналитические зависимости для определения диаметра и шага стержней, а также усилий, возникающих в П-образных стержнях обоймы. Результаты расчета по предложенным зависимостям хорошо согласуются с экспериментальными данными (рисунок 8). При этом расхождение составляет до 10 % в сторону запаса прочности.

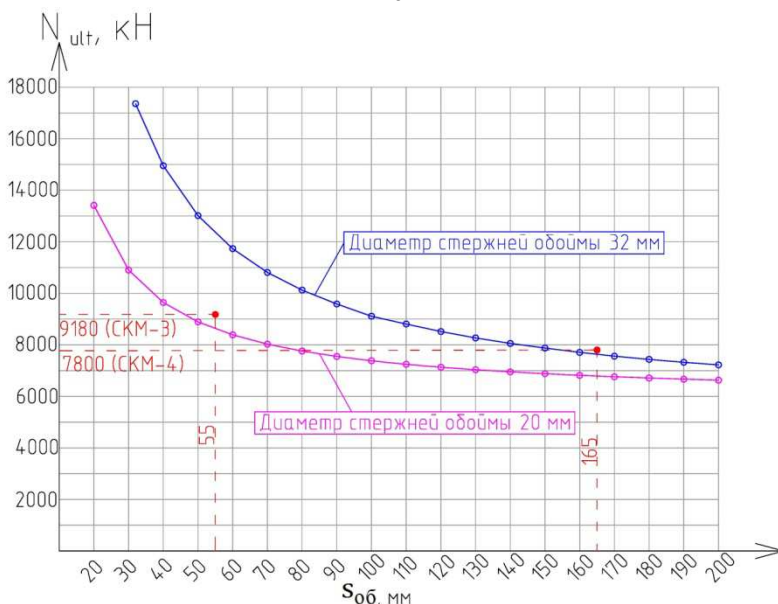


Рисунок 8 – Графики зависимости несущей способности стыков железобетонных колонн, усиленных металлической обоймой в виде П-образных стержней, от шага стержней усиления

В приложениях к диссертации приведены документы, подтверждающие внедрение результатов исследований диссертационной работы и краткое описание некоторых модулей разработанной программы «JBK-DM-Styk» с фрагментами исходного кода для расчета железобетонных колонн и их стыков с использованием областей относительного сопротивления, реализующая деформационную модель с учетом нелинейной работы бетона и арматуры.

В качестве направлений дальнейшего развития диссертационных исследований следует отметить разработку метода расчета стыков сборных железобетонных колонн при косом внецентренном статическом и кратковременном динамическом нагружениях.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

1. На основе анализа, обзора и систематизации современных теоретических и экспериментальных данных определены предельные состояния по прочности и деформативности стыков сборных железобетонных колонн и способы их нормирования, а также особенности и предпосылки их расчетов при кратковременном динамическом нагружении с учетом нелинейного деформирования бетона и арматуры.

2. Разработаны программа и методика экспериментальных исследований стыков железобетонных колонн при кратковременном динамическом воздействии, при реализации которых была создана оригинальная конструкция испытательного стенда с измерительными устройствами, новизна которого подтверждена патентом РФ на изобретение и патентом РФ на полезную модель.

3. Экспериментальные исследования усиленных стыков железобетонных колонн позволили получить новые опытные данные о характере включения в работу элементов металлических обойм, получены схемы трещинообразования и разрушения стыков при статическом и кратковременном динамическом нагружениях. Выявлены повышенные поперечные деформации бетона в зоне стыка, которые уменьшаются по мере удаления от него. Несущая способность стыков железобетонных колонн, усиленных металлическими обоймами, возрастает в 1,3–1,4 раза при статическом и более чем в 1,5 раза при кратковременном динамическом нагружении по сравнению с не усиленными стыками.

4. Проведенные численные исследования методом конечных элементов в трехмерной постановке при кратковременном динамическом воздействии по программе Dynamic 3D позволили получить новые данные по деформированию железобетонных колонн и их стыков во всем диапазоне нагружения с учетом волновых процессов. Расчеты по данной диаграмме позволили выявить повышенные поперечные деформации, определенные непосредственно в уровне стыка колонн. Полученные схемы трещинообразования и разрушения имеют удовлетворительную сходимость с результатами экспериментальных исследований. Однако расчеты при помощи данной программы трудоемки и длительны, при этом затруднено решение задач по определению требуемого армирования конструкции.

5. Разработан метод расчета прочности стыков железобетонных колонн по предельным усилиям при кратковременном динамическом нагружении, основанный на теории сопротивления анизотропных материалов сжатию и пространственной модели разрушения стыков профессора Соколова Б.С. Выявлено влияние на несущую способность стыков: класса бетона, геометрических параметров конструкции и угла наклона боковых граней пространственной модели. Полученные на основе расчета графики позволяют решать задачи прямого и обратного проектирования стыков колонн. При этом расхождения между теоретической и экспериментальной разрушающими нагрузками составляют 9,5–22,0 %, что подтверждает корректность предложенного метода расчета стыков сборных железобетонных колонн при кратковременном динамическом нагружении.

6. На основе нелинейной деформационной модели разработан метод расчета по прочности железобетонных колонн и их стыков при статическом и кратковременном динамическом нагружениях с учетом экспериментально полученных предпосылок и физической нелинейности бетона и арматуры.

Разработанный метод доведен до программного продукта, позволяющего выполнить расчет железобетонных колонн и их стыков при любом сочетании продольных сил и изгибающих моментов. Отклонения теоретических результатов расчета от экспериментальных данных составляют 7–15 % в сторону запаса прочности.

7. Предложены усиление стыков железобетонных колонн металлической обоймой в виде П-образных стержней и инженерный метод его расчета, новизна которых подтверждена патентом на изобретение РФ.

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

1. **Гончаров, М.Е.** Экспериментальные и численные исследования прочности стыков железобетонных колонн при кратковременном динамическом нагружении [Текст] / В.С. Плевков, А.В. Радченко, П.А. Радченко, М.Е. Гончаров // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. – 2014. – № 3. – С. 37–41.
2. **Гончаров, М.Е.** Исследование работы стыков железобетонных колонн, усиленных металлическими элементами, при статическом и кратковременном динамическом нагружениях [Текст] / В.С. Плевков, М.Е. Гончаров // Вестник ТГАСУ. – 2013. – № 2. – С. 154–165.
3. **Гончаров, М.Е.** Особенности разрушения железобетонных конструкций при динамическом нагружении [Текст] / В.С. Плевков, А.В. Радченко, И.В. Балдин, П.А. Радченко, М.Е. Гончаров, С.П. Батуев // Вестник Тамбовского университета. – 2013. – Том 18, вып. 4. – С. 1578–1579.
4. **Гончаров, М.Е.** Численное моделирование влияния стыков на деформацию и разрушение железобетонных колонн [Текст] / В.С. Плевков, А.В. Радченко, П.А. Радченко, М.Е. Гончаров, С.П. Батуев // Вектор науки Тольяттинского государственного университета. – 2013. – № 3 (25). – С. 242–245.
5. **Гончаров, М.Е.** Особенности работы стыков сборных железобетонных колонн при кратковременном динамическом нагружении [Текст] / В.С. Плевков, М.Е. Гончаров // Известия Казанского архитектурно-строительного университета. – 2014. – № 3. – С. 15–21.

Патенты на изобретения и полезные модели

6. Патент РФ на изобретение № 2401424. МПК G01N 3/30 (2006/01). Стенд для испытания железобетонных элементов на кратковременное динамическое сжатие / В.С. Плевков, Г.И. Однокопылов, И.В. Балдин, Д.Ю. Саркисов, **М.Е. Гончаров**, П.В. Дзюба; заявитель и патентообладатель ГОУ ВПО «ТГАСУ» – 2009131954/28 заявл. 24.08.2009; опубл. 10.10.2010 Бюл. № 28.
7. Патент РФ на изобретение № 2412318. МПК E04G 23/02 (2006/01). Способ усиления колонны / В.С. Плевков, И.В. Балдин, **М.Е. Гончаров**; заявитель

и патентообладатель ГОУ ВПО «ТГАСУ» – 2009149803/03(073470) заявл. 31.12.2009; опубл. 20.02.2011 Бюл. № 5.

8. Патент на полезную модель № 102113. МПК G01 N 3/303, G01 M 7/08. Устройство для динамического нагружения испытываемой конструкции с демпфером повышенной живучести / В.С. Плевков, Г.И. Однокопылов, О.Ю. Тига́й, С.В. Балдин, **М.Е. Гончаров**, Д.Н. Кокорин; заявитель и патентообладатель ГОУ ВПО «ТГАСУ» – 2010142671/28 заявл. 18.10.2010; опубл. 10.02.2011 Бюл. № 4.

Статьи в других печатных изданиях

9. **Гончаров, М.Е.** Influence of strengthening on destruction of reinforced concrete elements of designs at dynamic loading [Текст] / В.С. Плевков, А.В. Радченко, И.В. Балдин, П.А. Радченко, М.Е. Гончаров // Актуальные проблемы механики сплошной среды: Труды Международной конференции, посвященной 100-летию академика НАН Армении Н.Х. Арутюняна, 08–12 октября 2012, Цахкадзор, Армения. – Ереван. Тигран Мец. – 2012. Том 2. – С. 297–301.
10. **Гончаров, М.Е.** Особенности расчета стыков железобетонных колонн при кратковременном динамическом нагружении [Текст] / В.С. Плевков, А.В. Радченко, П.А. Радченко, М.Е. Гончаров // Материалы Международной научно-технической конференции «Современные проблемы строительных материалов, конструкций, механики грунтов и сложных реологических систем». Книга 1. «Современные проблемы строительных материалов и конструкций». – Самарканд. – 2013. – С. 23–27.
11. **Гончаров, М.Е.** Экспериментальные исследования работы стыков железобетонных колонн, усиленных металлическими элементами [Текст] / В.С. Плевков, М.Е. Гончаров // Научные труды Общества железобетонщиков Сибири и Урала. Вып. 10. –Новосибирск: НГАСУ (Сибстрин). – 2010. – С. 69–72.
12. **Гончаров, М.Е.** Оценка прочности железобетонных колонн при кратковременном динамическом нагружении с использованием теории разрушения контактных стыков профессора Б.С. Соколова [Текст] // Перспективы развития фундаментальных наук [Электронный ресурс]: труды XI Международной конференции студентов и молодых учёных. Россия, Томск, 22–25 апреля 2014 г. – С. 739–741.
13. **Гончаров, М.Е.** Прочность железобетонных колонн пространственно работающих каркасов зданий при динамических воздействиях [Текст] / В.С. Плевков, И.В. Балдин, С.В. Балдин, Д.Ю. Саркисов, М.Е. Гончаров // Безопасность строительного фонда России. Проблемы и решения. Материалы международных академических чтений. – Курск 2007. – С. 123–126.
14. **Гончаров, М.Е.** Исследование прочности и деформативности стыков железобетонных колонн, усиленных металлическими обоймами [Текст] // II Всероссийская конференция «Актуальные проблемы строительной от-

расли» (66-я научно-техническая конференция НГАСУ (Сибстрин)): тезисы докладов. – Новосибирск: НГАСУ (Сибстрин). – 2009. – С. 42–43.

15. **Гончаров, М.Е.** Прочность и деформативность стыков железобетонных колонн зданий [Текст] / В.С. Плевков, И.В. Балдин, М.Е. Гончаров // Проблемы и перспективы развития жилищно-коммунального комплекса города: Шестая Международная научно-практическая конференция. – М.: МИКХиС. – 2008. – С. 153–156.
16. **Гончаров, М.Е.** Прочность и деформативность железобетонных колонн и их стыков при статических и динамических воздействиях [Текст] / В.С. Плевков, И.В. Балдин, М.Е. Гончаров // Том. гос. архит.-строит. ун-т. – Томск, 2008 – 25с. – Библиогр.: 5 назв. – Рус. – Деп. ВИНТИ РАН 05.02.2008, № 79 – В2008.
17. **Гончаров, М.Е.** Методика и результаты экспериментальных исследований стыков железобетонных колонн, усиленных металлическими элементами [Текст] / В.С. Плевков, И.В. Балдин, М.Е. Гончаров, В.Б. Максимов, И.А. Ботьева // Том. гос. архит.-строит. ун-т. – Томск, 2010 – 43 с. – Библиогр.: 10 назв. – Рус. – Деп. ВИНТИ РАН 25.01.2010, № 25 – В2010.
18. **Гончаров, М.Е.** Исследование работы стыков железобетонных колонн [Текст] / М.Е. Гончаров, А.А. Прокопова // Материалы 56-й научно-технической конференции студентов и молодых ученых [Текст]. – Томск: Изд-во Том. гос. архит.-строит. ун-та, 2010. – С. 24–27.

Подписано в печать 06.02.2015 . Формат 60×84.
Бумага офсет. Гарнитура Таймс. Уч.-изд. л. 1,15.
Тираж 120 экз. Заказ № 62.

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