

На правах рукописи



БАЛДИН СЕРГЕЙ ВЛАДИМИРОВИЧ

**ПРОЧНОСТЬ И ТРЕЩИНОСТОЙКОСТЬ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ
ЭЛЕМЕНТОВ ПРИ СОВМЕСТНОМ ДЕЙСТВИИ ИЗГИБАЮЩИХ
МОМЕНТОВ, ПРОДОЛЬНЫХ И ПОПЕРЕЧНЫХ СИЛ ОТ
СТАТИЧЕСКОГО И КРАТКОВРЕМЕННОГО ДИНАМИЧЕСКОГО
НАГРУЖЕНИЯ**

05.23.01 – Строительные конструкции, здания и сооружения

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Томск – 2013

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: **Митасов Валерий Михайлович,**
доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой «Железобетонные конструкции» ФГБОУ ВПО «Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет» (Сибстрин), г. Новосибирск;

Трекин Николай Николаевич,
доктор технических наук, профессор,
начальник отдела конструктивных систем
ОАО «ЦНИИПромзданий», г. Москва.

Ведущая организация: **26 Центральный научно-исследовательский институт, филиал ОАО «31 Государственный проектный институт специального строительства», г. Москва**

Защита состоится 17 мая 2013 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. 5, ауд. 307.

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

Автореферат разослан «15» апреля 2013 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Копаница Н.О.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. В настоящее время проблемам проектирования и расчета железобетонных конструкций при воздействии на них интенсивных динамических нагрузок различного характера уделяется много внимания. При указанных воздействиях, с учетом пространственной работы зданий и сооружений, в конструкциях возникают сложнапряженные состояния, при которых в сечениях элементов могут одновременно действовать изгибающие моменты, продольные и поперечные силы, изменяющиеся не синхронно во времени, в связи с чем необходимо учитывать большое количество расчетных сочетаний усилий при расчетах прочности нормальных и наклонных сечений.

Действующие методы расчета прочности нормальных и наклонных сечений железобетонных конструкций имеют методологические разрывы и не обладают концептуальным единством, позволяющим получать из более общих расчетов частные случаи. Оценка трещиностойкости при совместном действии изгибающих моментов, продольных и поперечных сил от динамических воздействий практически не изучены.

В связи с этим задача разработки и совершенствования методов расчета железобетонных элементов при одновременном действии изгибающих моментов, продольных и поперечных сил от статических и кратковременных динамических воздействий является актуальной, имеющей теоретическое и практическое значение.

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 2012 - 2013 г.г. по теме № 7.5413 «Экспериментально - теоретические исследования железобетонных балок на податливых опорах при кратковременном динамическом нагружении», а также тематического плана ФГБОУ ВПО «Томский государственный архитектурно-строительный университет» в 2007 - 2012 г.г.

Объектом исследования являются стержневые железобетонные конструкции симметричного сечения.

Предметом исследования являются методы расчета силового сопротивления по прочности и трещиностойкости железобетонных элементов при одновременном действии изгибающих моментов, продольных и поперечных сил от статических и кратковременных динамических воздействий.

Цель работы. Разработка, реализация и экспериментальная проверка метода расчета по прочности и трещиностойкости железобетонных элементов при одновременном действии изгибающих моментов, продольных и поперечных сил от статических и кратковременных динамических воздействий на основе поверхностей относительного сопротивления с учетом физической нелинейности бетона и арматуры.

Задачи исследования:

- на основе обзора, систематизации и анализа современных теоретических и экспериментальных данных определить предельные состояния и способы их нормирования, а также предпосылки расчета железобетонных элементов при кратковременном динамическом действии изгибающих моментов, продольных и поперечных сил с учетом нелинейной работы бетона и арматуры;
- выявить аналитические зависимости изменения границ относительной прочности и трещиностойкости железобетонных элементов при действии изгибающих моментов, продольных и поперечных сил от статических и кратковременных динамических воздействий с учетом нелинейной работы материалов и статистической обработки результатов экспериментальных исследований, а также разработать алгоритмы и программы расчета;
- разработать стенды и провести экспериментальные исследования железобетонных элементов при кратковременном динамическом действии продольных и поперечных сил;
- провести анализ результатов расчета по предлагаемому методу и сопоставить с численными и экспериментальными исследованиями;
- разработать предложения по практическому расчету элементов железобетонных решетчатых конструкций с учетом разработанного метода.

Методология работы.

Исследования выполнены на основе фундаментальных положений в области железобетона. Физический эксперимент проведен с использованием оригинального измерительного оборудования в лаборатории кафедры железобетонных и каменных конструкций Томского государственного архитектурно-строительного университета, что обеспечило необходимую достоверность полученных результатов.

Научная новизна работы заключается в получении новых знаний о работе железобетонных элементов при одновременном действии изгибающих моментов, продольных и поперечных сил, а именно:

- на основе теории поверхностей относительного сопротивления по прочности и трещиностойкости разработаны расчетная модель и алгоритм расчета железобетонных элементов симметричных сечений при одновременном действии изгибающих моментов, продольных и поперечных сил;
 - разработаны и экспериментально проверены аналитические зависимости расчета железобетонных элементов при совместном действии изгибающих моментов, продольных и поперечных сил от статических и кратковременных динамических воздействий, реализующие деформационную модель и учитывающие нелинейную работу бетона и арматуры;
- получены новые экспериментальные данные о напряженно-деформированном состоянии, прочности и деформативности железобетонных элементов при одновременном действии изгибающих моментов, продольных и поперечных сил от статического и кратковременного динамического воздействия.

ческого нагружения; установлено влияние величины продольной силы на прочность и трещиностойкость таких железобетонных элементов;

– разработана методика экспериментальных исследований железобетонных элементов при одновременном действии изгибающих моментов, продольных и поперечных сил от статического и кратковременного динамического нагружения, а также оригинальное устройство для создания и контроля уровня продольной силы, новизна которого подтверждена патентом РФ;

Практическая значимость работы заключается в получении научно-обоснованных результатов для совершенствования методов расчета железобетонных элементов при одновременном действии изгибающих моментов, продольных и поперечных сил при статическом и кратковременном динамическом нагружении, а также в создании пакета программных продуктов, позволяющих значительно упростить и сократить сроки решения задач прямого и обратного проектирования железобетонных элементов при таких видах нагружения.

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 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. Необходимая точность метода расчета подтверждена удовлетворительным совпадением теоретических и экспериментальных данных.

Реализация работы. Созданные по разработанной методике программные продукты используются в расчетах железобетонных конструкций в 26 Центральном научно-исследовательском институте, филиале ОАО «31 Государственный проектный институт специального строительства», а также применяются при проектировании каркасов новых монолитных зданий (для ОАО ПИ «Кузбасскоммунпроект», г. Кемерово; ООО АПБ «ДиаС», г. Томск) и оценке несущей способности железобетонных конструкций существующих зданий и сооружений (например: строение № 285 ООО «Научно-исследовательская организация «СИБУР-ТОМСКНЕФТЕХИМ» (НИОСТ), расположенное на Северной площадке Томской особой экономической зоны технико-внедренческого типа), что подтверждено справками о внедрении. Результаты исследований включены в специальный курс и лабораторные работы кафедры «Железобетонные и каменные конструкции» ФГБОУ ВПО «Томский государственный архитектурно-строительный университет» при подготовке бакалавров, специалистов и магистров по направлению 270100 «Строительство».

Личный вклад диссертанта состоит:

- в разработке методики и проведении экспериментальных исследований железобетонных элементов при совместном действии изгибающих моментов, продольных и поперечных сил от статического и кратковременного динамического нагружения;
- в разработке метода, алгоритма и программ расчета железобетонных элементов симметричных сечений на статические и кратковременные динамические воздействия при любом сочетании изгибающих моментов, продольных и поперечных сил;
- в выполнении аналитических и численных расчетов железобетонных элементов при совместном действии изгибающих моментов, продольных и поперечных сил от статических и кратковременных динамических воздействий.

На защиту выносятся:

- расчетная модель силового сопротивления железобетонных элементов по прочности и трещиностойкости при совместном действии изгибающих моментов, продольных и поперечных сил от статических и кратковременных динамических воздействий, реализующая деформационную модель и нелинейную работу бетона и арматуры;
- алгоритм и результаты численного анализа влияния геометрических параметров, армирования, уровня продольной силы на прочность и трещиностойкость железобетонных элементов при совместном действии изгибающих моментов и поперечных сил;
- методика и результаты экспериментальных исследований железобетонных элементов при одновременном действии изгибающих моментов, продольных и поперечных сил;
- рекомендации по расчету прочности и трещиностойкости железобетонных элементов решетчатых конструкций.

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы докладывались на научных семинарах кафедры «Железобетонные и каменные конструкции» Томского государственного архитектурно-строительного университета (2008 – 2012 г.г.); на VI и VII Международных конференциях студентов и молодых ученых «Перспективы развития фундаментальных наук» (г. Томск, 2009 г., 2010 г., ТПУ), на Международной научно-методической конференции, посвященной 100-летию со дня рождения В.Н. Байкова (4-5 апреля 2012 г., г. Москва). В полном объеме работа доложена и одобрена на совместном научном семинаре кафедр ФГБОУ ВПО ТГАСУ (г. Томск, февраль 2013 года) и на совместном научном семинаре кафедр ФГБОУ ВПО НГАСУ (Сибстрин) (г. Новосибирск, апрель 2013 года).

Публикации. По материалам диссертации опубликовано 14 печатных работ, включая одну статью, опубликованную в журнале «Вестник ТГАСУ», входящем в перечень изданий, рекомендованных ВАК для опубликования основных научных результатов диссертаций на соискание ученой степени

кандидата технических наук, 3 свидетельства об официальной регистрации программы для ЭВМ и 2 патента РФ на полезную модель.

Объем и структура работы. Диссертация объемом 256 страниц машинописного текста состоит из введения, пяти глав, основных выводов, списка литературы из 212 наименований, 3 приложений, включая 6 таблиц, 110 рисунков.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность темы диссертации, дается общая характеристика работы, формулируются цель и задачи исследования, излагается структура диссертации.

В первой главе выполнены обзор и проведен анализ теоретических и экспериментальных данных о работе железобетонных элементов при совместном действии изгибающих моментов, продольных и поперечных сил от статических и динамических воздействий.

В работе показано, что имеющееся большое количество как теоретических, так и экспериментальных работ отечественных и зарубежных ученых посвящено изучению поведения железобетонных элементов при статическом действии изгибающих моментов, продольных и поперечных сил. Вопросы прочности и, особенно, трещиностойкости железобетонных элементов при кратковременном динамическом действии указанных выше усилий в достаточной мере не освещены.

Динамические расчеты железобетонных конструкций связаны с решением целого комплекса вопросов, основными из которых являются: выявление параметров динамических нагрузок; определение предельных состояний и способов их нормирования; учет изменения прочностных и деформативных характеристик бетона и арматуры при кратковременном динамическом нагружении; определение усилий, действующих в конструкциях, и др.

Современные методы динамических расчетов железобетонных конструкций основаны на общем принципе использования полных запасов их прочности, при этом допускается кратковременное деформирование сечений и элементов в стадии разрушения материалов, что существенно отличается от подходов при расчетах на статические нагрузки.

Над созданием и развитием методов расчета железобетонных конструкций при действии кратковременных динамических нагрузок работали: Баженов Ю.М., Бакиров Р.О., Белобров И.К., Белов Н.Н., Бондаренко В.М., Гвоздев А.А., Дикович И.А., Егорова О.Д., Жарницкий В.И., Жунусов Т.Ж., Забегаяев А.В., Карпенко Н.И., Кириллов А.П., Копаница Д.Г., Котляревский В.А., Коренев Б.Г., Кумпяк О.Г., Лоскутов О.М., Лужин О.В., Майоров В.И., Маилян Л.Р., Митасов В.М., Пилгогин Л.П., Плевков В.С., Плотников А.И., Попов Г.И., Попов Н.Н., Пузанков Ю.И., Рабинович И.М., Радченко А.В., Расторгуев Б.С., Рахманов В.А., Рыков Г.В., Сарксян А.Е., Сеницын А.П., Смолянин А.Г., Ставров Г.Н., Тихонов И.Н., Тонких Г.П., Трекин Н.Н., Удальцов В.С., Чарыев М., Чернов Ю.Г., Яковенко Г.П. и другие.

Все существующие в настоящее время методы расчета прочности при действии изгибающих моментов, продольных и поперечных сил отличаются различным учетом предельных усилий в бетоне и арматуре, видами расчетных схем, способами оценки влияния различных факторов на несущую способность элементов.

Влияние продольных сил в СНиП и СП учитывается интегрально коэффициентом φ_n (рис. 1), который изначально не учитывал прочность железобетонных элементов, близкую к осевому растяжению и сжатию (линия 1). С последующим развитием норм была принята криволинейная (линия 2) и кусочно-линейная (линия 3) зависимости коэффициента φ_n , в которых учтена прочность бетонного сечения, однако не учитывается наличие продольной арматуры в сечении железобетонного элемента при сжатии [точка $\alpha_{s,tot,c} = R_{sc} A_{stot} / (R_b A)$] и растяжении [точка $\alpha_{s,tot,t} = R_s A_{stot} / (R_b A)$], где A_{stot} - площадь всей продольной арматуры в сечении.

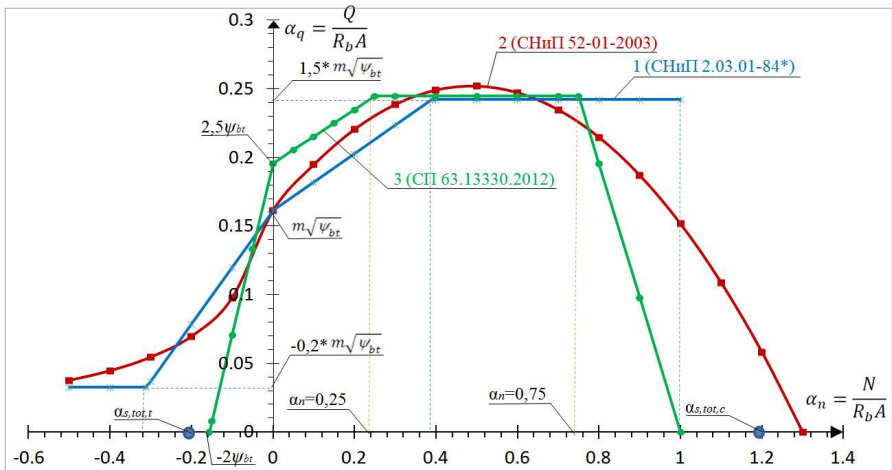


Рис. 1. Границы области относительной прочности железобетонного сечения при действии продольных и поперечных сил

Анализ литературных и нормативных источников показал, что на сегодняшний день отсутствуют единые принципы расчета железобетонных элементов при совместном действии изгибающих моментов, продольных и поперечных сил, во всем диапазоне действующих усилий от растяжения до сжатия. Дальнейшее развитие методов расчета может происходить в направлении более глубокого исследования характера трещинообразования и разрушения железобетонных конструкций, в том числе и при кратковременных динамических воздействиях.

На основе проведенного анализа состояния вопроса сформулированы основные направления исследований.

Вторая глава посвящена предпосылкам и расчету железобетонных конструкций по определению усилий от действия статических и кратковременных динамических нагрузжений.

На основе выполненного анализа экспериментальных и теоретических исследований сформулированы предельные состояния и способы их нормирования в абсолютных и относительных величинах расчетных параметров, использующиеся при динамических расчетах железобетонных конструкций от совместного действия изгибающих моментов, продольных и поперечных сил. Нормирование предельных состояний осуществляется по предельным усилиям при образовании трещин или по прочности; по деформациям бетона и арматуры; по отношению предельного прогиба к прогибу в упругой стадии; по раскрытию трещин и другим параметрам.

Определены предпосылки динамического расчета железобетонных элементов при совместном действии изгибающих моментов, продольных и поперечных сил, которыми являются кусочно-линейные динамические диаграммы деформирования бетона и арматуры, изменяющиеся по логарифмическим зависимостям во времени деформирования, а также аналитическое описание кратковременных динамических воздействий при дефлаграционном горении газо-, пылевоздушных смесей. При этом, коэффициенты динамического упрочнения основных параметрических точек нелинейных диаграмм бетона и арматуры приняты на основе зависимостей предложенных Баженовым Ю.М., Поповым Г.И. и Котляревским В.А.

Определение усилий в железобетонных элементах при действии кратковременной динамической нагрузки в работе выполняется аналитическим или численным методами.

Выполнен динамический расчет шарнирно опертых и защемленных на опорах сжато-изогнутых железобетонных элементов, а также элементов плоских поперечных рам каркасных зданий. Приведены расчетные зависимости для различных стадий работы конструкций: упругой стадии работы элемента без трещин (стадия 1^a), условно упругой стадии работы элемента с трещинами (стадия 1^b), позволяющие определять внутренние усилия (изгибающие моменты, продольные и поперечные силы), действующие одновременно в рассматриваемых сечениях.

При использовании аналитического метода расчета рассматриваются уравнения движения конструкции для каждой стадии работы элемента, полученные из уравнения динамического равновесия, решение которых определено методом Бубнова-Галеркина. Искомые параметры уравнения движения определяются умножением статических составляющих на функцию динамичности.

Получены графики изменения коэффициентов динамичности для принятых видов динамической нагрузки в зависимости от частоты собственных колебаний элементов, а также проанализировано влияние уровня продольной сжимающей силы на изменение частоты колебаний ω и коэффициента динамичности k_d . Анализ результатов выполненных расчетов и данные других авторов показывают, что при динамическом нагружении коэффициент дина-

мичности по поперечной силе возрастает интенсивнее, чем по изгибающему моменту, что делает разрушение конструкции от действия поперечной силы более вероятным и опасным. Поэтому в данной работе этому вопросу уделяется особое внимание.

Анализ выполненных расчетов пространственных систем каркасных зданий показывает, что для каждого сечения элементов необходимо учитывать множество комбинаций усилий M , N , Q . Это связано с тем, что при расчете железобетонных конструкций с учетом их совместной работы, податливости опор и других факторов искомые величины усилий достигают максимальных значений в разные промежутки времени, а процесс достижения их максимальных значений может носить колебательный характер.

Разработаны алгоритм и программа «RSUScad», которая позволяет производить необходимую выборку РСУ, полученных при статических и динамических расчетах, а также передавать полученные результаты в абсолютных или относительных величинах в разработанные программы прочностных расчетов железобетонных элементов «JBK-NM», «JBK-DM-SP», «JBK-NMQ», реализующие деформационную модель и нелинейную работу бетона и арматуры.

В третьей главе рассматривается общий метод расчета прочности и трещиностойкости железобетонных элементов с использованием теории поверхностей относительного сопротивления на основе нелинейной деформационной модели при одновременном действии изгибающих моментов M_i , продольных N_i и поперечных Q_i сил от статического и кратковременного динамического нагружения.

Условиям прочности сечений железобетонных элементов в пространстве относительных усилий

$$\alpha_n = N_i / (R_{bd} A), \quad \alpha_m = M_i / (R_{bd} S), \quad \alpha_q = Q_i / (R_{bd} A) \quad (1)$$

соответствует замкнутая выпуклая поверхность относительного сопротивления (рис. 2), которая трансформируется вокруг временной координаты для динамически нагруженных конструкций. Границы пересечения поверхности с плоскостями $\alpha_m - \alpha_n$ и $\alpha_q - \alpha_n$ образуют области относительной прочности, которые описываются выпуклыми кривыми второго порядка. У данных границ имеются общие точки поверхности сопротивления, соответствующие относительной прочности рассматриваемого элемента при центральном растяжении и осевом сжатии. Между этими плоскостями принята линейная аппроксимация поверхности относительной прочности железобетонных элементов при действии изгибающих моментов и поперечных сил ($\alpha_m - \alpha_q$) при фиксированном значении продольной силы.

Для железобетонных элементов предельные относительные усилия, воспринимаемые сечением в плоскости $\alpha_m - \alpha_n$ (область «А»), определяются по следующим зависимостям:

$$\alpha_{m,ult} = \alpha_{mb} + \alpha_{ms}, \quad (2)$$

$$\alpha_{n,ult} = \alpha_{nb} + \alpha_{ns}, \quad (3)$$

где α_{mb} , α_{nb} – относительные изгибающий момент и продольная сила, воспринимаемые бетоном сечения;

α_{ms} , α_{ns} – относительные изгибающий момент и продольная сила, воспринимаемые арматурой относительно центра тяжести бетонного сечения.

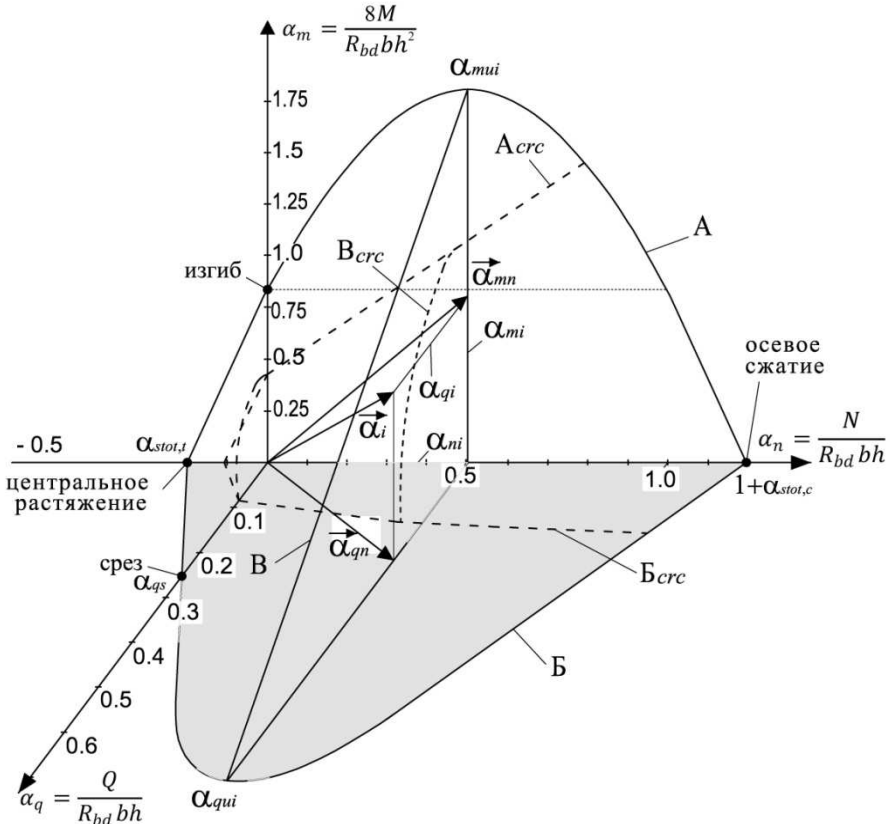


Рис. 2. Поверхность относительного сопротивления по прочности и трещиностойкости железобетонных элементов при действии изгибающих моментов M (α_m), продольных N (α_n) и поперечных Q (α_q) сил

В диссертационной работе определение усилий, воспринимаемых бетоном, производится с использованием прямоугольной, нелинейной и трехлинейной эпюр напряжений в бетоне сжатой зоны сечения. Получены аналитические зависимости, описывающие границы относительной прочности железобетонных элементов, выявлены основные закономерности изменения границ областей в зависимости от формы сечений, характера и величины армирования, прочностных характеристик бетона и арматуры и других параметров.

Для области α_m - α_n прочности нормальных сечений железобетонных элементов разработаны компьютерные программы: «*JBK-NM*», реализующая прямоугольную эпюру напряжений в бетоне сжатой зоны сечения, и «*JBK-DM-SP*», основанная на деформационной модели, использующей нелинейные диаграммы бетона и арматуры. На программы получены свидетельства о государственной регистрации.

В плоскости действия продольных и поперечных сил (плоскость $\alpha_q - \alpha_n$, см. рис. 2, область «Б») границы области относительной прочности железобетонных элементов описываются кривой второго порядка, имеющей вид:

$$\alpha_{q,ult} = \frac{0,577\sqrt{\psi_{bt} + q_s}}{\alpha_{s,tot,t}(1 + \alpha_{s,tot,c})}(\alpha_n + \alpha_{s,tot,t})(1 + \alpha_{s,tot,c} - \alpha_n), \quad (4)$$

где $\psi_{bt} = R_{bt}/R_b$; $\alpha_{s,tot,t}$, $\alpha_{s,tot,c}$ – относительные усилия, воспринимаемые арматурой при растяжении и сжатии; если $\alpha_{s,tot,t} < \psi_{bt,ser}$, то $\alpha_{s,tot,t} = \psi_{bt,ser}$, $\psi_{bt,ser} = R_{bt,ser}/R_b$;

$q_s = 0,577\alpha_{s,tot}\beta$, $\beta = 0 \dots 1$ – коэффициент, интегрально характеризующий влияние «нагельного» эффекта в продольной арматуре, возникающего при действии в железобетонном элементе поперечных сил. «Нагельный» эффект в продольной арматуре сказывается на напряженно-деформированном состоянии конструкции и зависит от многих условий и факторов, таких как вид, диаметр и расположение арматуры в сечении, класс бетона и его гранулометрический состав, силы зацепления по берегам трещин и др. В настоящей диссертации принят интегральный подход по определению «нагельного» эффекта, предложенный Бондаренко В. М. и Колчуновым Вл. И.

Граница области относительной прочности $\alpha_q - \alpha_n$ имеет характерные точки (рис. 2): относительное усилие при центральном растяжении, воспринимаемое бетонным сечением ($\alpha_n = -\psi_{bt,ser}$) или арматурой ($\alpha_n = -\alpha_{s,tot,t}$); относительное усилие при осевом сжатии, воспринимаемое бетонным сечением ($\alpha_n = 1$) или железобетонным ($\alpha_n = 1 + \alpha_{s,tot,c}$); относительное усилие, воспринимаемое бетонным или железобетонным сечением на срез ($\alpha_{qs} = 0,577\sqrt{\psi_{bt} + q_s}$).

Между плоскостями $\alpha_m - \alpha_n$ и $\alpha_q - \alpha_n$ линейная зависимость (область «В») описывается выражениями:

$$\begin{cases} \alpha_{m,ult} = \alpha_m(\alpha_n) \left[1 - \frac{\alpha_{qi}}{\alpha_q(\alpha_n)} \right] \\ \alpha_{q,ult} = \alpha_q(\alpha_n) \left[1 - \frac{\alpha_{mi}}{\alpha_m(\alpha_n)} \right], \end{cases} \quad (5)$$

что определяет прочность железобетонных элементов при действии изгибающих моментов и поперечных сил при фиксированном значении продольных сил.

Условия прочности сечений железобетонных элементов в относительных величинах будут иметь вид:

$$\left. \begin{aligned} \alpha_{m,ult} - \alpha_{mi} &\geq 0, \\ \alpha_{q,ult} - \alpha_{qi} &\geq 0, \\ \alpha_{n,ult} - \alpha_{ni} &\geq 0. \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

Разность между проекциями векторов поверхности относительного сопротивления и действующих относительных усилий является векторным представлением запаса прочности сечений железобетонных элементов.

Графически условия прочности представлены на рис. 2. При этом если концы векторов относительных усилий от внешних воздействий с координатами начала ($\alpha_n = \alpha_m = \alpha_q = 0$) и концов, определяемых по выражению (1), располагаются внутри поверхности сопротивления, то условия прочности рассматриваемого сечения выполняются, если выходят за пределы поверхности сопротивления, то прочность не обеспечивается.

В диссертационной работе получены аналитические зависимости описания границ поверхности трещиностойкости железобетонных элементов при действии изгибающих моментов, продольных и поперечных сил.

Изгибающий момент и продольная сила, воспринимаемые сечением перед образованием нормальной трещины (в плоскости $\alpha_m - \alpha_n$, область « A_{crc} »), могут быть представлены суммой моментов и продольных сил для бетона и арматуры в сечении относительно центра тяжести бетонного сечения

$$\alpha_{m,crc} = \alpha_{mb,crc} + \alpha_{ms,crc}; \quad \alpha_{n,crc} = \alpha_{nb,crc} + \alpha_{ns,crc}, \quad (7)$$

где $\alpha_{mb,crc}$ и $\alpha_{nb,crc}$ – изгибающий момент и продольная сила, воспринимаемые бетоном перед образованием трещин; $\alpha_{ms,crc}$ и $\alpha_{ns,crc}$ – изгибающий момент и продольная сила, воспринимаемые арматурой. Данные величины в работе определяются по деформационной теории или по теории ядровых моментов.

Условие образования трещин в железобетонных элементах при действии изгибающих моментов, продольных и поперечных сил представлено выражением

$$\alpha_{q,crc} = \frac{2}{3} \psi_{bt,ser,d} \frac{k_{s1}}{k_{s2}} \sqrt{1 - \frac{3\alpha_m \zeta}{2\psi_{bt,ser,d} k_1} \pm \frac{\alpha_n}{\psi_{bt,ser,d} (1 + \alpha \mu_s + \alpha' \mu'_s)}}. \quad (8)$$

Здесь коэффициенты k_{s1} , k_{s2} определяются в зависимости от процента армирования и расположения арматуры в сечении, $\zeta = y/h$.

Совмещение областей относительной прочности и трещиностойкости (см. рис. 2) наглядно показывает соотношения усилий, при которых рассматриваемые сечения или конструкция в целом работают с трещинами или без таковых.

В диссертационной работе выполнен анализ изменения областей относительной прочности и трещиностойкости в зависимости от класса бетона, количества и расположения арматуры в сечении, уровня продольной силы. Получено, что с увеличением класса бетона относительная трещиностойкость уменьшается, а зона работы сечения элемента с трещинами увеличивается

При этом заметное снижение относительной трещиностойкости отмечается при увеличении класса бетона с В10 до В60 (в 1,14...1,7 раза); при дальнейшем увеличении класса бетона (до В90) относительная трещиностойкость практически не изменяется (на 0,4...1,8 %).

Расположение арматуры в сечении оказывает значительное влияние на прочность и трещиностойкость при действии изгибающих моментов и продольных сил (в плоскости $\alpha_m - \alpha_n$). В плоскостях $\alpha_q - \alpha_n$ и $\alpha_m - \alpha_q$ это влияние не значительно. Увеличение коэффициента армирования с $\mu = 0,005$ до $\mu = 0,036$ приводит к увеличению относительной трещиностойкости в плоскости $\alpha_m - \alpha_n$ в 1,1...1,425 раза. В плоскости $\alpha_q - \alpha_n$ относительная трещиностойкость с увеличением армирования снижается в 1,15...1,25 раза.

В четвертой главе приведены результаты экспериментальных и численных исследований работы нормальных сечений железобетонных элементов прямоугольного сечения при действии поперечной силы в зависимости от величины сжимающей продольной силы.

Для верификации предпосылок и метода расчета по прочности при совместном действии продольных и поперечных сил выполнены экспериментальные и численные исследования 124 бетонных и железобетонных образцов 22 серий, в которых варьировались количество и диаметр арматуры, ее расположение в сечении, уровень обжатия, вид поперечного воздействия (статическое или кратковременное динамическое).

Экспериментальные образцы представляли собой бетонные и железобетонные элементы прямоугольного сечения размерами 150*150*600 мм с расчетным пролетом 300 мм. Армирование было выполнено каркасами с рабочей арматурой из двух или четырех стержней диаметром 6 или 8 мм класса А400 (АIII).

Для испытаний железобетонных элементов на кратковременную динамическую нагрузку использовался стенд на базе копровой установки, разработанный на кафедре железобетонных и каменных конструкций Томского государственного архитектурно-строительного университета (см. рис. 3).

На разработанные оригинальные конструктивные решения испытательного стенда, нагружающее устройство для создания постоянного уровня сжимающей силы и ее контроля и устройство для динамического нагружения испытываемой конструкции с демпфером повышенной живучести получены патенты РФ.

Для получения, сбора и анализа необходимых данных о работе бетонных и железобетонных элементов при одновременном действии продольных и поперечных сил при кратковременном динамическом нагружении использовались разработанная методика проведения экспериментальных исследований, измерительные приборы и устройства совместно с регистрирующими комплексами МИС-300, МИС-400. Все используемые приборы, устройства, датчики, тензорезисторы были соответствующим образом поверены и оттарированы, что обеспечило достоверность полученных в ходе экспериментов данных.



Рис. 3. Общий вид испытания сжатых железобетонных элементов на поперечные кратковременные динамические нагрузки

Кратковременная динамическая нагрузка создавалась при помощи энергии падающего груза копровой установки и передавалась на экспериментальные образцы в соответствии со схемой их загрузки. Продолжительность действия нагрузки в экспериментальных исследованиях составляла 18...24 мс. Разрушающая нагрузка (от 147,7 до 319,6 кН) достигалась через 6,5...9,5 мс. Запозывание пика деформаций бетона и арматуры экспериментальных образцов относительно пика действующей нагрузки составило 3...4,5 мс.

При кратковременном динамическом нагружении исследуемые железобетонные элементы доведены до разрушения, характерные схемы разрушения которых представлены на рис. 4, а.

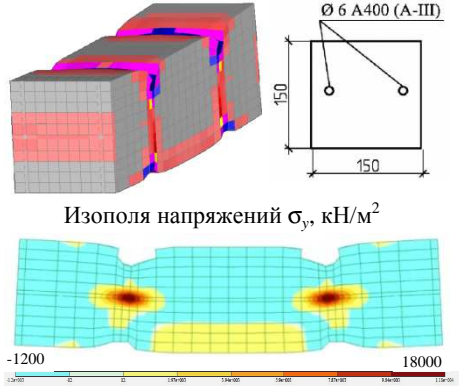
В результате проведенных экспериментальных исследований установлено, что увеличение уровня относительной продольной сжимающей силы до значения $0,5R_bbh$ дает повышение несущей способности на 35 %. При дальнейшем увеличении продольной силы наблюдается снижение несущей способности железобетонных элементов.

С применением ВК «ЛИРА» проведены численные исследования железобетонных элементов при совместном действии изгибающих моментов, продольных и поперечных сил при статическом и кратковременном динамическом нагружении, которые позволили получить схемы образования и развития трещин в элементах, картину напряженно-деформированного состояния, влияние «нагельного» эффекта, зависящего от диаметра, количества арматуры и ее расположения в сечении (рис. 4, б, в). Анализ исследований показывает, что выполненные расчеты дают удовлетворительную сходимость с экспериментальными и теоретическими исследованиями при уровне обжатия не более $0,375R_bbh$.

а)



б)



в)

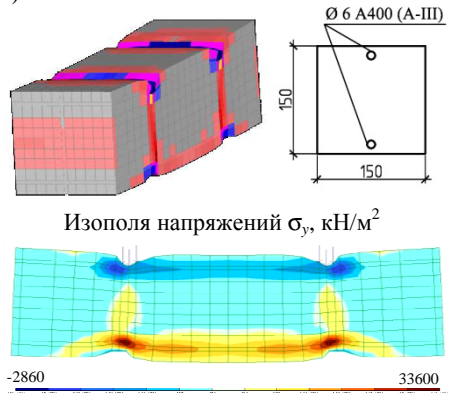


Рис. 4. Экспериментальные и численные исследования сжатых бетонных и железобетонных элементов при поперечной нагрузке: а – характерное разрушение бетонных и железобетонных элементов при динамическом нагружении; б, в - результаты расчетов в ВК «Лира» железобетонных образцов с обжатием $0,25R_b b h$ с арматурой $2 \text{ } \varnothing 6 \text{ A400 (A-III)}$, расположенной горизонтально (б) или расположенной вертикально (в)

Пятая глава посвящена обработке экспериментальных данных с использованием методов математической статистики, сравнению результатов экспериментальных данных с теоретическими исследованиями, разработке программы расчета железобетонных элементов при совместном действии изгибающих моментов, продольных и поперечных сил.

В качестве исследуемых параметров для статистического анализа были приняты величины относительных разрушающих поперечных сил при фиксированных значениях продольных сил для бетонных и железобетонных элементов.

Границы области относительной прочности в плоскости $\alpha_q - \alpha_n$ описываются с учетом статистической обработки экспериментальных данных с наложением ограничителей, соответствующих характерным точкам – относительное усилие, воспринимаемое бетонным или железобетонным сечением при растяжении и сжатии, при этом приняты аналитические зависимости второго порядка вида

$$\alpha_{q,ult} = k + k_1\alpha_n + k_2\alpha_n^2, \quad (9)$$

где значения полученных коэффициентов k, k_1, k_2 приведены таблице 1

Таблица 1

Значения коэффициентов k, k_1, k_2 , а также $q_s = k - 0,577\sqrt{\psi_{bt}}$

Армирование элемента	% армирования	k	k_1	k_2	q_s
Бетонный элемент	0	0,2015	1,5194	-1,7279	0,0401
2 Ø6 мм, горизонтально	0,25	0,2778	2,0278	-2,1152	0,1164
2 Ø 6 мм, вертикально	0,25	0,2695	1,9557	-2,0516	0,1081
2 Ø 8 мм, горизонтально	0,45	0,3079	1,8865	-1,8983	0,1465
2 Ø 8 мм, вертикально	0,45	0,2959	1,8047	-1,8185	0,1345
4 стержня Ø 6 мм	0,5	0,3257	1,8198	-1,8198	0,1643

Сопоставление результатов расчета по регрессионной аналитической зависимости (9) и зависимости (4) показало близкое их совпадение (рис. 5) для бетонных и железобетонных элементов с симметричным армированием, которые вписываются в интервал доверительной вероятности 0,95, полученный для экспериментальных данных.

По результатам выполненных теоретических и экспериментальных исследований, в том числе с учетом результатов статистического анализа, составлен алгоритм расчета и разработана программа «*JBK-NMQ*» расчета железобетонных элементов при совместном действии изгибающих моментов, продольных и поперечных сил с использованием областей относительного сопротивления, реализующая деформационную модель с учетом нелинейной работы бетона и арматуры. На программу, разработанную в среде разработки прикладных программ «*Turbo Delphi*», получено свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Программа «*JBK-NMQ*» позволяет решать задачи прямого и обратного проектирования железобетонных элементов при действии изгибающих моментов, продольных и поперечных сил во всем диапазоне действия внутренних усилий – от центрального растяжения до осевого сжатия, а также наглядно, в графическом виде представить результаты выполненных расчетов и оценить действительные запасы прочности.

Сопоставление результатов расчетов железобетонных элементов при действии продольных и поперечных сил по предложенной методике с результатами экспериментальных исследований ученых Белоброва И.К., Майляна Р.Л., Шеиной С.Г., Лоскутова О.М., а также с результатами собственных исследований показало их удовлетворительную сходимость (от 2,0 до 13%).

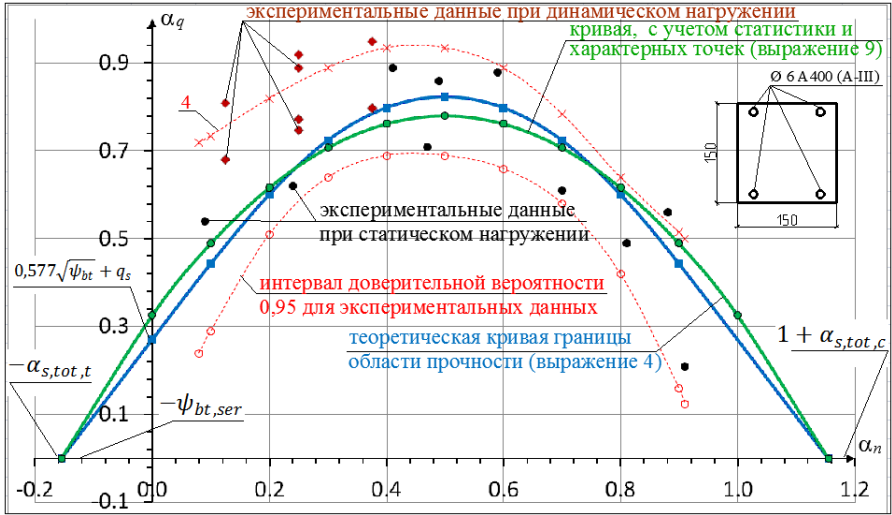


Рис. 5. Границы области относительной прочности $\alpha_n - \alpha_q$ железобетонного элемента с армированием 4Ø6 A400 (А-III), построенные по результатам статистической обработки экспериментальных и теоретических данных

Кроме того, предлагаемый метод расчета дает результаты, более близкие к экспериментальным, чем методика, используемая в нормативных источниках.

Проведенные исследования позволили предложить уточнения в расчет прочности и трещиностойкости элементов решетчатых железобетонных конструкций (двухветвевые колонны, фермы с параллельными поясами, решетчатые стропильные балки). В настоящее время по методу, предложенному профессором Сигаловым Э.Е., расчет двухветвевых колонн производится из условия распределения продольной силы между ветвями колонны по закону «рычага», равного распределения поперечной силы между ветвями, а изгибающие моменты от действия поперечных сил определяют из условия, что нулевые точки моментов расположены посередине высоты панели (см. рис. 6, а). При действии в одной из ветвей растягивающих усилий и при образовании в ней трещины поперечная сила полностью передается в сжатую ветвь, вследствие чего изгибающий момент в ней возрастает в два раза.

Предлагаемый метод с использованием областей относительного сопротивления позволяет перераспределять величины поперечных сил в поясах решетчатых конструкций в зависимости от величины продольной силы. Получены зависимости для определения относительных усилий α_n , α_q , α_p согласно которым поперечная сила в поясах вычисляется: в относительных величинах по формуле (4) заменяя α_n на α_{ni} , $\alpha_{q,ult}$ на α_{qi} , где $i = 1, 2$ – номер пояса (ветви) решетчатой конструкции, а в абсолютных величинах из выражений:

$$Q_{B,1} = \frac{Q_i}{1 + \frac{\alpha_{q,2}}{\alpha_{q,1}}}; \quad (10)$$

$$Q_{B,2} = \frac{Q_i}{1 + \frac{\alpha_{q,1}}{\alpha_{q,2}}}, \quad (11)$$

что значительно изменяет перераспределение внутренних усилий в ветвях решетчатых колонн (рис. 6).

Для проверки полученных аналитических зависимостей были проведены экспериментальные исследования натурной предварительно напряженной решетчатой балки, которые подтвердили обоснованность предложенного метода расчета, позволяющего реально оценить прочность элементов решетчатых конструкций при совместном действии изгибающих моментов, продольных и поперечных сил.

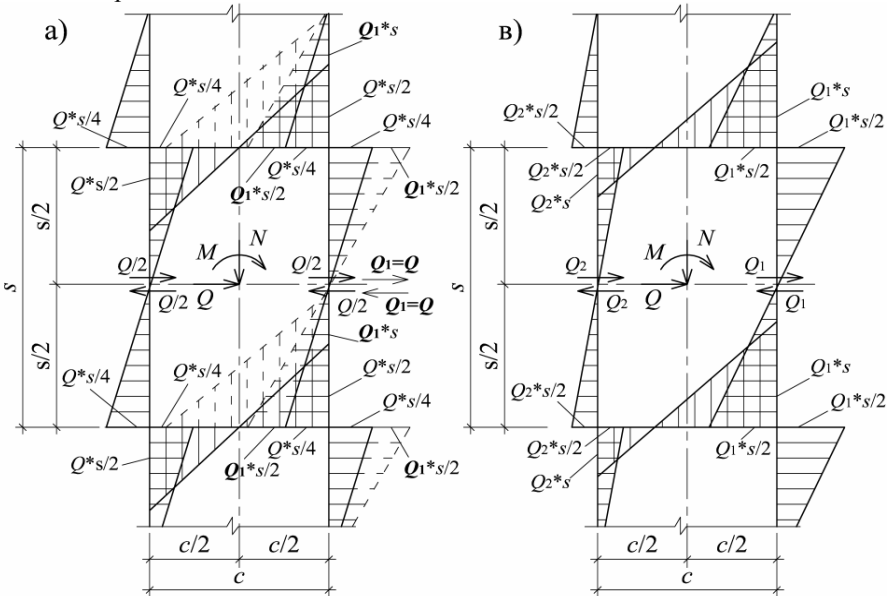


Рис. 6. К определению усилий в элементах железобетонных двухветвевых колонн: а – распределение изгибающих моментов в ветвях и распорках по существующему методу расчета; б – распределение изгибающих моментов в ветвях и распорках по предлагаемому методу

Результаты испытаний показали, что между верхним и нижним поясами балки происходит перераспределение усилий. С образованием трещин в нижнем поясе происходит снижение величин моментов, при этом значения моментов в верхнем поясе растут интенсивнее, аналогично перераспределению величин моментов в ветвях двухветвевых колонн (рис. 6, б).

Предложенный метод расчета железобетонных элементов решетчатых конструкций использован при оценке несущей способности двухветвевых железобетонных колонн существующих зданий, например здания ООО «НИОСТ», строение 285, расположенного на Северной площадке Томской особой экономической зоны технико-внедренческого типа. Выполненные расчеты позволили выявить действительные запасы прочности элементов двухветвевых колонн каркаса здания с учетом изменившихся нагрузок при реконструкции.

В приложениях к диссертации приведены краткое описание и фрагменты исходного кода некоторых модулей разработанной программы расчета железобетонных элементов по методу, изложенному в диссертации; свидетельства о регистрации программ для ЭВМ; документы, подтверждающие внедрение результатов исследований диссертационной работы.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

1. На основе поверхностей относительного сопротивления и нелинейной деформационной модели разработан метод расчета прочности и трещиностойкости стержневых железобетонных элементов симметричного сечения при совместном действии изгибающих моментов, продольных и поперечных сил, который обладает единым методологическим подходом при расчете от центрального растяжения до осевого сжатия, позволяющий принимать более обоснованные решения.
2. Получены аналитические зависимости, описывающие границы относительной прочности и трещиностойкости железобетонных элементов при действии изгибающих моментов, продольных и поперечных сил от статических и кратковременных динамических воздействий с учетом нелинейной работы бетона и арматуры и статистической обработки результатов экспериментальных исследований.
3. Разработанный метод и алгоритм расчета реализованы в программе, на которую получены свидетельства об официальной регистрации программ для ЭВМ. Установлено, что отклонения результатов расчета от экспериментальных данных составляют 2,0 – 13,0 % в сторону запаса прочности.
4. Разработана методика экспериментальных исследований железобетонных элементов при действии продольных статических сжимающих и поперечных кратковременных динамических сил, при реализации которой создана оригинальная конструкция испытательного стенда (новизна подтверждена патентами РФ).
5. Экспериментально получены новые опытные данные, характеризующие процесс сопротивления железобетонных конструкций в зависимости от величины относительной продольной силы, диаметра, количества и расположения арматуры в сечении. При этом установлено, что увеличение уровня продольной сжимающей силы до значения $0,5R_bbh$ приводит к повышению несущей способности на 35 %.

6. Предложен метод расчета элементов решетчатых железобетонных конструкций, в котором распределение поперечных сил между поясами производится в соответствии с теорией поверхностей относительного сопротивления по прочности и трещиностойкости. Обоснованность предложенного метода подтверждена экспериментами на натурной предварительно напряженной решетчатой балке.
7. Разработанный метод и программный продукт используются в 26 Центральном научно-исследовательском институте, филиал ОАО «31 Государственный проектный институт специального строительства», а также применяются при проектировании каркасов новых монолитных зданий (для ОАО ПИ «Кузбасскоммунпроект», г. Кемерово и ООО «Диас», г. Томск) и оценке несущей способности железобетонных конструкций существующих зданий, что подтверждено справками о внедрении.

Публикации по теме диссертации

Статьи в журналах, включенных в перечень ВАК

1. **Балдин С.В.** Расчет железобетонных решетчатых конструкций при статическом и кратковременном динамическом нагружении с использованием поверхностей относительного сопротивления по прочности [Текст] / В.С. Плевков, И.В. Балдин, С.В. Балдин // Вестник ТГАСУ. 2011. – № 2, С. 67-78 (доля автора 50 %).

Статьи в других печатных изданиях

2. **Балдин С.В.** Пространственная работа девятиэтажного кирпичного жилого дома, пострадавшего в результате пожара [Текст] / В.С. Плевков, И.В. Балдин, С.В. Балдин, Н.Ф. Гладко // Пространственные конструкции зданий и сооружений (Исследования, расчет, проектирование и применение): сб. статей. Вып. 10 / МОО «Пространственные конструкции»; под ред. В.В. Шугаева и др. – М., 2006. – С. 168-176 (доля автора 35 %).
3. **Балдин С.В.** Оценка прочности и деформативность элементов купола здания мечети мусульманского духовно-культурного центра в г. Кемерово при статических и динамических воздействиях [Текст] / В.С. Плевков, И.В. Балдин, Е.А. Мелёхин, С.В. Балдин // Пространственные конструкции зданий и сооружений (Исследования, расчет, проектирование и применение): сб. статей. Вып. 11 / МОО «Пространственные конструкции»; под ред. В.В. Шугаева и др. – М.: 2008. – С. 165-172 (доля автора 45 %).
4. **Балдин С.В.** Совершенствование метода расчета железобетонных элементов при совместном действии изгибающих моментов, продольных и поперечных сил [Текст] / С.В. Балдин, Р.А. Сух, М.О. Щербаков // «Перспективы развития фундаментальных наук» Труды VI Международной конференции студентов и молодых ученых. Россия, Томск. 26-29 мая 2009 г. / Под ред. Г.А. Вороновой – Томский политехнический университет, 2009. – С. 747-750 (доля автора 75 %).

5. **Балдин С.В.** Программы расчета железобетонных элементов на действие изгибающих моментов, продольных и поперечных сил с использованием областей относительного сопротивления по прочности и нормативных документов // «Перспективы развития фундаментальных наук» Труды VII Международной конференции студентов и молодых ученых. Россия, Томск. 20-23 апреля 2010 г. / Под ред. Г.В. Ляминой, Е.А. Вайтулевич.– Томский политехнический университет, 2010. – С. 558-561 (доля автора 100 %).
6. **Балдин С.В.** Особенности повышения сейсмостойкости железобетонных конструкций существующих зданий и сооружений [Текст] / В.С. Плевков, И.В. Балдин, С.В. Балдин // Будівельні конструкції: Міжвідомчий науково-технічний збірник наукових праць (будівництво) / Будівництво в сейсмічних районах України. - Вып.73. - Київ, ДП НДІБК, 2010, 832 с. С. 232-238. (доля автора 50 %).
7. **Балдин С.В.** К расчету железобетонных двухветвевых колонн с использованием поверхностей относительного сопротивления по прочности [Текст] / В.С. Плевков, И.В. Балдин, С.В. Балдин // Безопасность строительного фонда России. Проблемы и решения: Материалы международных академических чтений. / редколл.: С.И. Меркулов (отв. Ред.) [и др.]; – Курск, гос. Ун-т. – Курск, 2011. – С. 131-141 (доля автора 30 %).
8. **Балдин С.В.** Расчет прочности элементов железобетонных двухветвевых колонн зданий и сооружений [Текст] / В.С. Плевков, С.Н. Колупаева, И.В. Балдин, С.В. Балдин // Сборник докладов Международной научно-методической конференции, посвященной 100-летию со дня рождения В.Н. Байкова (4-5 апреля 2012 г.) / под ред. д.т.н. А.Г. Тамразяна; – МГСУ - Москва., 2012, - С. 296-306 (доля автора 50 %).
9. **Baldin S.V.** LA SOLIDITE ET LA FISSURATION DINAMIQUE DES CONSTRUCTIONS EN BETON ARME SOUMISES A L'ACTION DES SOULLICITATIONS COMPLIQUES / REVUE DES SCIENCES / V.S. Plevkov, I.V. Baldin, S.V. Baldin, A.G. Kolmagorov [Текст] // UNIVERSITE GAMALABDEL NASSER DE CONAKRY. REPUBLIQUE DE GUINEE, № 8-2010. pp. 58-63. (доля автора 45 %).

Патенты и свидетельства

10. Патент РФ № 90901 от 20 января 2010 года, МПК G01N 3/303 (2006.01). Стенд для испытания железобетонных элементов на действие изгибающих моментов, продольных и поперечных сил при кратковременном динамическом нагружении / В.С. Плевков, И.В. Балдин, Г.И. Однокопылов, **С.В. Балдин** (доля автора 45 %).
11. Патент РФ № 102113 от 10 февраля 2011 года, МПК (2009) G01N 3108, 3130. Устройство для динамического нагружения испытываемой конструкции с демпфером повышенной живучести / В.С. Плевков, Г.И. Однокопылов, О.Ю. Тигай, **С.В. Балдин**, М.Е. Гончаров, Д.Н. Кокорин (доля автора 26 %).

12. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2007613133 от 25 июля 2007 года. Программа для расчета прочности нормальных сечений элементов железобетонных конструкций с использованием областей относительного сопротивления («*JBK-NM-2*» ver. 1.0) / В.С. Плевков, И.В. Балдин, **С.В. Балдин** (доля автора 50 %).
13. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2010610486 от 11 ноября 2009 года. Программа для расчета прочности нормальных сечений элементов железобетонных конструкций на основе деформационной модели согласно СП 52-101-2003 («*JBK-DM-SP*» ver. 1.0) / В.С. Плевков, И.В. Балдин, **С.В. Балдин** (доля автора 50 %).
14. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2010612601 от 26 февраля 2010 года. Программа для расчета прочности железобетонных конструкций при совместном действии изгибающих моментов, продольных и поперечных сил с использованием областей относительного сопротивления («*JBK-NMQ*» ver. 1.0) / В.С. Плевков, И.В. Балдин, **С.В. Балдин** (доля автора 60 %).

Подписано в печать 10.04.2013 . Формат 60x84.
Бумага офсет. Гарнитура Таймс. Уч.-изд. л. 1,15.
Тираж 100 экз. Заказ № 113

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.