

На правах рукописи

ТАЛАНТОВ ИВАН СЕРГЕЕВИЧ

**СПЕКТРАЛЬНО-ЧИСЛЕННЫЙ МЕТОД
ДИНАМИЧЕСКОГО РАСЧЕТА ФИЗИЧЕСКИ
НЕЛИНЕЙНЫХ СТЕРЖНЕВЫХ СИСТЕМ С
ВЫКЛЮЧАЮЩИМИСЯ ЭЛЕМЕНТАМИ**

Специальность: **05.23.17** — **Строительная механика**

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург — 2016

Работа выполнена в ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет»

Научный руководитель: кандидат технических наук, доцент
Бондарев Юрий Владимирович

Официальные оппоненты: **Уздин Александр Моисеевич**
доктор технических наук, профессор,
ФГБОУ ВО «Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I», кафедра «Теоретическая механика», профессор;

Павлов Андрей Сергеевич
кандидат технических наук, ФГБОУ ВО «НИУ Московский государственный строительный университет», научно-образовательный центр компьютерного моделирования уникальных зданий, сооружений и комплексов, научный сотрудник;

Ведущая организация: **ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого»**

Защита диссертации состоится «13» октября 2016 г. в 16-00 часов на заседании диссертационного совета Д **212.223.03** при ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет» по адресу: 190005, Санкт-Петербург, ул. 2-я Красноармейская, д.4, зал заседаний диссертационного совета (аудитория 219).

Тел./Факс: (812) 316-58-72; E-mail: rector@spbgasu.ru

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет» и на сайте www.spbgasu.ru.

Автореферат разослан « _____ » _____ 2016 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
доктор технических наук,
профессор

Кондратьева Лидия Никитична

I ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность избранной темы. Строительная механика призвана обеспечивать прикладную науку знаниями, позволяющими создавать рациональные конструкции зданий и сооружений, отвечающие самым строгим требованиям прочности, устойчивости и надежности. Однако, даже точное выполнение всех нормативных требований на каждом этапе жизненного цикла сооружения не может гарантировать абсолютно безотказную работу конструкций. Проведение расчетов на особое сочетание нагрузок из списка регламентированных не исключает шанс возникновения аварийных ситуаций, сопряженных с воздействиями, физическая природа, направление и интенсивность которых предсказать заранее невозможно. Подобные аварии провоцируют отказ одного или нескольких элементов системы, что может привести к возникновению лавинообразного обрушения всей конструкции. Как следствие, если нет возможности гарантированно исключить возможность первоначального (инициирующего) отказа, необходим механизм оценки напряженно-деформированного состояния поврежденной конструкции.

Описанный подход известен в литературе как прямой метод расчета зданий на прогрессирующее обрушение и, как правило, ведется с применением одной из трех расчетных методик:

- нелинейной статической;
- нелинейной динамической;
- линейной динамической.

В практических расчетах широко применяются первые два подхода, обладающие, соответственно, малой трудоемкостью с низкой точностью и исключительно высокой трудоемкостью с высокой точностью решения. От применения динамического расчета в линейной постановке в форме разложения по собственным формам отказываются ввиду невозможности его применения при наличии нелинейности (физической и геометрической), заменяя прямым численным интегрированием уравнений движения, в том числе, на этапах линейного деформирования.

Реалии современного законодательства в области регулирования проектирования ответственных конструкций требуют от прикладной науки новых методов и алгоритмов, позволяющих анализировать точный динамический отклик здания на внезапное выключение элементов с учетом нелинейностей, при этом не требующих исключительных вычислительных мощностей.

Степень разработанности темы исследования. Проблема живучести зданий и сооружений в целом и защиты от прогрессирующего обрушения в частности активно развивается в последнее десятилетие, особенно после серии трагических аварий природного и техногенного характера. Указанной теме посвятили свои работы такие ученые, как: Алмазов В.О., Белостоцкий А.М., Бондарев Ю.В., Бондаренко В.М., Городецкий А.С., Гениев Г.А., Драган В.И., Емельянов С.Г., Еремеев Е.Г., Ерёмин К.И., Колчунов В.И., Ключева Н.В., Ларионов В.В., Меркулов С.И., Мкртычев О.В., Мондрус В.Л., Назаров Ю.П.,

Осовских Е.В., Павлов А.С., Петров И.А., Плетнев В.И., Плотников А.И., Потапов А.Н., Пятикрестовский К.П., Расторгуев Б.С., Серпик И.Н., Симбиркин В.Н., Перельмутер А.В., Ройтман В.М., Тамразян А.Г., Уфимцев Е.М., Чернов Ю.Т. и др.

Настоящая работа посвящена совершенствованию динамических методов расчета конструкций в условиях экстремальных воздействий, развитие которых связано, в первую очередь, с теорией расчета зданий и сооружений на сейсмостойкость. Некоторые положения разработанного в диссертации алгоритма расчета базируются на положениях теории сейсмостойкости, а среди авторов, внесших вклад в развитие методов динамического расчета строительных конструкций в условиях воздействия землетрясений, следует отметить Я.М. Айзенберга, Т.А. Белаш, А.Н. Бирбраера, А.В. Индейкина, И.О. Кузнецову, В.В. Лалина, А.М. Масленникова, Ю.Л. Рутмана, О.А. Савинова, Э. Симборта, В.И. Смирнова, А.М. Уздина, Г.С. Шульмана и др.

Цель исследования состоит в разработке нового метода динамического расчета стержневых физически нелинейных систем, подверженных внезапным изъятиям связей и элементов.

Задачи исследования:

— Провести анализ современного состояния методов оценки живучести зданий в условиях экстремальных воздействий и решения частной задачи — расчета зданий на прогрессирующее обрушение, вызванное внезапным отказом элемента или связи;

— Предложить интерпретацию иницирующего силового воздействия, выводящего систему из равновесия в момент выключения элемента;

— Описать и исследовать изменение параметров колебаний при выключении очередного элемента в системе, уже совершающей колебания;

— Записать в общем виде аналитическое решение неоднородного дифференциального уравнения движения системы из нелинейно-упругого материала с выключающейся связью, применимое в практических расчетах для экспресс-оценки последствий начального её повреждения;

— Разработать алгоритм комбинированного метода расчёта стержневых систем с выключающимися элементами, сочетающего в себе преимущества линейно-спектрального метода (спектрального) и прямого численного интегрирования (численного метода). Продемонстрировать преимущества разработанного спектрально-численного метода;

— Предложить способы оптимизации расчета как на этапе использования линейно-спектрального метода, так и на этапе прямого численного интегрирования;

— Учесть в алгоритме явление геометрической нелинейности, в том числе, на этапе использования линейно-спектрального метода расчета;

— Разработать критерий оценки погрешности в момент перехода от решения, использующего разложение по собственным формам колебаний к прямому численному интегрированию;

— Разработать программу в среде MathCad. С её помощью произвести анализ стойкости к прогрессирующему обрушению реального металлического пространственного покрытия.

Объект исследования — пространственные строительные конструкции из физически нелинейных материалов в условиях аварийных воздействий.

Предмет исследования — поведение пространственных стержневых систем из физически нелинейных материалов при аварийном воздействии в виде внезапного изъятия элементов.

Научная новизна исследования заключается в достижении следующих конкретных результатов:

1. Обосновано использование мгновенного уменьшения упругой реакции системы в качестве иницирующего силового воздействия, выводящего систему из равновесия при выключении элемента. Указанное приращение упругой реакции равно по величине силе инерции, а соответствующее последней ускорение может быть применено в качестве одного из начальных условий в поиске постоянных интегрирования при решении уравнения движения.

2. Выявлен и описан эффект уменьшения размаха колебаний при последовательном выключении элементов в движущейся системе, что повышает стойкость систем к прогрессирующему обрушению даже без учёта пластического ресурса материалов.

3. Выведены в общем виде аналитические решения, применимые для экспресс-анализа реакции физически нелинейных систем на внезапное выключение связи или элемента.

4. Разработан метод динамического расчета физически нелинейных стержневых систем с выключающимися элементами, представляющий собой комбинацию положений линейно-спектральной теории и прямого численного интегрирования. Метод позволяет для каждого этапа деформирования конструкции применять положения той теории расчета, достоинства которой раскрываются в наибольшей мере. На основании разработанного спектрально-численного метода составлена программа в среде MathCad, апробированная на примере расчета покрытия павильона №5а ОАО «ЛЕНЭКСПО» на прогрессирующее обрушение.

5. Обоснованы критерии ограничения спектра значимых частот на этапе линейно-спектрального расчета для снижения ресурсоемкости алгоритма. Разработана методика отбора главных динамических степеней свободы для этапа численного интегрирования уравнения движения систем с выключающимися элементами.

6. Разработан критерий оценки погрешности, проявляющейся в момент перехода от линейно-спектрального к численному расчету и способ её снижения.

Теоретическая значимость работы заключается в расширении набора методов, применимых к решению задачи о колебаниях систем с выключающимися элементами. Результаты работы могут использоваться при

дальнейшем совершенствовании динамических расчетов конструктивно нелинейных систем.

Практическая значимость диссертационного исследования заключается в разработке алгоритма и программы динамического расчета физически и геометрически нелинейных пространственных шарнирно-стержневых систем. Разработанные алгоритм и программа описывают напряженно-деформированное состояние конструкций со многими степенями свободы с учетом возможности выключения элементов в процессе колебаний.

Методология и методы исследования. В работе использовались методы строительной механики, сопротивления материалов и математического анализа. В частности, положения теории колебаний систем с сосредоточенными массами и метода конечных элементов. Для расчетов физически нелинейных систем использовались как аналитические (малого параметра Линдштедта-Пуанкаре), так и численные методы (Эйлера, Рунге-Кутта 4-го порядка, Адамса). В выводах основных допущений разработанного алгоритма применялись теории расчета сжато-изогнутых стержней при быстро возрастающей нагрузке и известные результаты испытаний конструкционных сталей при динамических нагрузках.

Положения, выносимые на защиту:

— методика решения уравнения движения систем, использующая в качестве иницирующего воздействия приращение упругой реакции поврежденной системы, равное по величине силе инерции;

— описание обнаруженного эффекта уменьшения размаха колебаний в упругих системах при выключении очередного элемента вблизи нижнего амплитудного значения;

— метод экспресс-оценки динамической реакции сводящихся к одномассовым систем, подверженных внезапному выключению связи(-ей) и элемента(-ов), базирующийся на аналитическом решении уравнения движения методом малого параметра Линдштедта-Пуанкаре;

— алгоритм спектрально-численного метода расчета физически нелинейных стержневых систем с выключающимися элементами, его программная реализация в среде MathCad и пример расчета пространственного металлического покрытия павильона №5а ОАО «ЛЕНЭКСПО»;

— критерии ограничения спектра значимых частот на этапе линейно-спектрального расчета и методика отбора главных степеней свободы на этапе прямого численного интегрирования;

— критерий оценки погрешности сопряжения спектрального и численного методов расчета.

Область исследования соответствует паспорту научной специальности 05.23.17 «Строительная механика», а именно п.7 «Теория и методы расчета сооружений в экстремальных ситуациях (землетрясения, ураганы, взрывы и так далее)».

Степень достоверности и апробация результатов базируется на использовании обоснованных исследований современных российских и

зарубежных ученых, применении строгого математического аппарата, а также сравнении результатов, полученных разными методами расчета.

Основные теоретические положения и выводы диссертационной работы были представлены на следующих конференциях: II международный конгресс «Актуальные проблемы современного строительства», Санкт-Петербург, СПбГАСУ, 10-12 апреля 2013г; Международная научно-практическая конференция «Актуальные проблемы строительства и архитектуры», Санкт-Петербург, СПбГАСУ, 09-11 апреля 2014 г.

Разработанный в диссертации алгоритм и расчетная программа апробированы при оценке стойкости металлических покрытий к внезапному изъятию элементов. Организацией ЗАО «ЭРКОН» выдана справка о внедрении результатов научных исследований и принятии программы автора для проведения расчетов проектируемых и реконструируемых зданий на прогрессирующее обрушение.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 7 печатных работ, общим объемом 3,42 п.л., в т. ч. 5 статей опубликованы в научных журналах, включенных в перечень, утвержденный ВАК РФ.

Структура и объем диссертационной работы. Диссертация изложена на 162 страницах печатного текста, состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы, включающего 124 источника, и двух приложений. В работе представлено 49 рисунков, 24 таблицы и 143 формулы.

Во введении обоснована актуальность темы диссертации. Приведены основные цели работы, её научная новизна, выносящиеся на защиту положения и основная структура исследования, а также сведения об апробации научных результатов.

В первой главе кратко изложены вопросы общей теории живучести строительных конструкций в условиях аварийных воздействий и её частная задача – защита зданий от прогрессирующего (лавинообразного) обрушения. Приведены основные направления исследований отечественных и зарубежных авторов по работе конструкций в запредельных состояниях. Выделены основные методы защиты зданий от прогрессирующего обрушения. Отмечено, что в настоящий момент на территории Российской Федерации отсутствует общепризнанный и закрепленный юридически порядок действий практикующего конструктора, занимающегося количественной оценкой напряженно-деформированного состояния конструкций, подверженных внезапному выключению связей и элементов. Приведены три основных метода расчета конструкций на выключение элементов: статический нелинейный, динамический линейный и динамический нелинейный. Предложено использовать в инженерной практике комбинированный метод динамического расчета, использующий разложение по формам колебаний на этапе упругого деформирования и прямое численное интегрирование по достижении напряжений текучести.

Во второй главе записано решение неоднородного уравнения движения систем с выключающимися в процессе колебаний элементами, основанное на разложении по собственным формам. На простых механических системах

доказано, что инициирующим силовым воздействием, приводящим к возникновению колебаний, является приращение упругой реакции поврежденной системы по направлению динамической степени свободы, которой соответствует сила инерции при записи уравнения динамического равновесия. Такое представление позволяет избавиться от необходимости использовать какие-либо дополнительные внешние воздействия на систему в момент выключения элемента, а пропорциональное силе инерции ускорение — использовать в качестве начального условия при решении уравнения движения. Аналитические решения записаны для одно- и многомассовых систем с выключающимися элементами, в том числе, уже совершающих колебания. Описан эффект изменения размаха колебаний в зависимости от параметров движения в момент выключения каждого очередного элемента.

В третьей главе описаны два метода решения задачи, учитывающие физически нелинейные свойства материала систем: численный и аналитический. Аналитическое решение получено в общем виде по методу малого параметра Линдштедта-Пуанкаре для случая аппроксимации исходной функции упругой реакции системы полиномами 3-й и 5-й степени. Описана возможность применения аналитического решения для получения динамической реакции одномассовых и сводящимся к ним систем на воздействие в виде внезапного выключения элементов/связей. Продемонстрирована погрешность квазистатического расчета на примере численного расчета методом Адамса физически нелинейной несимметричной системы.

В четвертой главе сформулированы основные положения разрабатываемого в диссертации метода. Описаны принятые допущения, относящиеся к вопросам динамической прочности стали и потери устойчивости стальными трубами большой гибкости при динамических нагрузках. Приведены принципы ограничения числа учитываемых собственных форм, критерий оценки погрешности при переходе от этапа использования аналитического решения к численному. Записан подробный алгоритм разработанного в диссертации спектрально-численного метода.

В пятой главе приведен пример практического использования разработанных в диссертации алгоритма и программы в среде MathCad. Проведен анализ стойкости реально существующего пространственного металлического покрытия к внезапному изъятию одного из элементов. Приведены четыре расчетных сценария, предполагающие разные начальные повреждения, сочетания внешних нагрузок и жесткости потерявших устойчивость элементов. На примере двух расчетных сценариев продемонстрировано преимущество использования решения, использующего разложение по собственным формам колебаний на первых стадиях обрушения, заключающееся в существенном повышении скорости счета, а также отсутствии накопления ошибки, присущей прямому численному интегрированию. Доказана эффективность использования комбинированного спектрально-численного метода решения при расчете строительных конструкций, состоящих из элементов большой гибкости.

II ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ ДИССЕРТАЦИИ, ВЫНОСИМЫЕ НА ЗАЩИТУ

1. Обосновано использование мгновенного уменьшения упругой реакции системы в качестве инициирующего силового воздействия, выводящего систему из равновесия при выключении элемента. Указанное приращение упругой реакции равно по величине силе инерции, а соответствующее последнее ускорение может быть применено в качестве одного из начальных условий в поиске постоянных интегрирования при решении уравнения движения.

Известно, что при внезапном разрушении элемента или связи в покоящейся системе, имеет место её динамическое догружение. Реакция строительных конструкций на такое догружение является основным результатом, вычисляемым в ходе решения задач на прогрессирующее обрушение. Однако, способ задания воздействия на поврежденную систему, наиболее точно описывающий факт мгновенного выключения элемента, зависит от взглядов конкретных авторов. Как правило, к поврежденной системе прикладываются дополнительные внешние силы или импульсы, изменяющиеся по некоторому закону.

На рисунке 1а представлена система с одной динамической степенью свободы, в которой происходит мгновенный обрыв одной из пружин. На рисунках 1б и 1в представлены все силы, действующие, соответственно, в исходной и поврежденной системах.

Обрыв одной из пружин приводит к мгновенному уменьшению совокупной реакции системы при постоянной внешней нагрузке. Согласно принципу мгновенного равновесия Даламбера, поврежденную систему в момент времени $t=0$ с следует уравновесить силой инерции, величина и направление которой известны, а закон изменения однозначно описывается уравнением движения. Ускорение, пропорциональное известной силе может быть использовано при поиске одной из постоянных интегрирования.

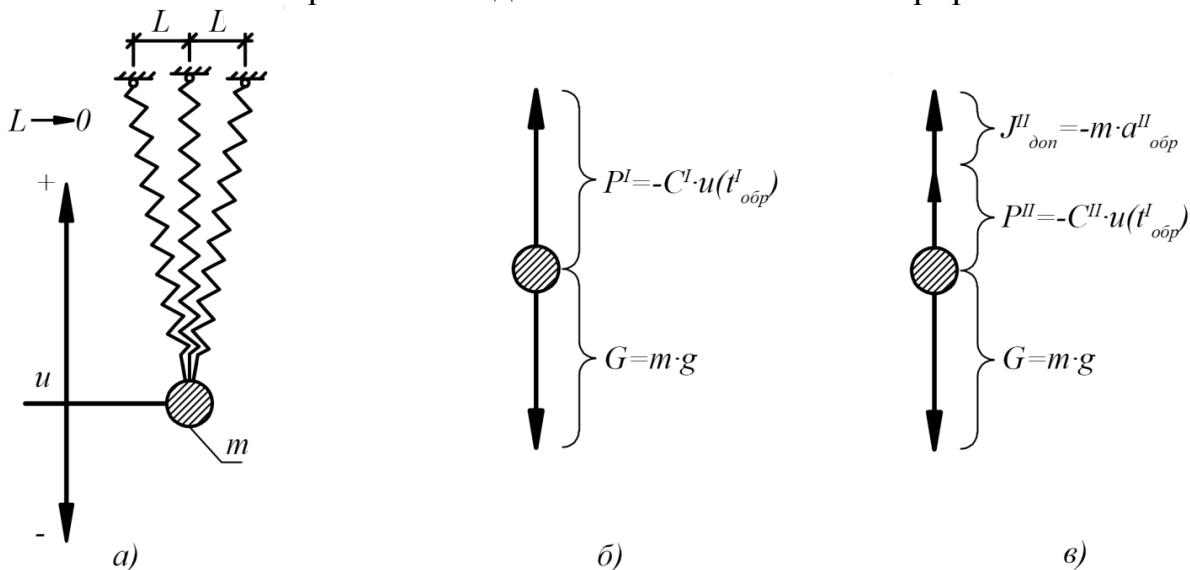


Рисунок 1 — Схема воздействий при мгновенном обрыве одной пружины в покоящейся системе

Величины, представленные на рисунке 1:

N — количество пружин в системе; $C^I = \sum_{i=1}^N c_i$ — суммарная жесткость исходной системы; $C^{II} = \sum_{i=1}^{N-1} c_i$ — то же, поврежденной системы; $u_{обр}^I$ — координата массы в момент обрыва пружины; $J_{дон}^{II} = (C^{II} - C^I) \cdot u_{обр}^I$ — сила инерции, возникающая в момент перехода от исходной системы (I) к поврежденной (II).

Общий принцип интерпретации инициирующего силового воздействия как приращения реакции поврежденной системы, удобно использовать и для случаев, в которых выключение элементов происходит уже в процессе колебаний. Временной интервал, в течение которого не происходит выключение очередного элемента, условимся называть стадией обрушения. В пределах каждой стадии q движение системы описывается одним уравнением вида:

$$m \cdot \ddot{u}^q + C^q \cdot u^q = m \cdot g \quad (1)$$

Решение уравнения (1) в общем виде для систем с одной динамической степенью свободы:

$$u^q = \left(u_{обр}^{q-1} - \frac{g}{\omega^q} \right) \cdot \cos \omega^q (t - t_{обр}^{q-1}) + \frac{v(t_{обр}^{q-1})}{\omega^q} \cdot \sin \omega^q (t - t_{обр}^{q-1}) + \frac{g}{\omega^q} \quad (2)$$

где ω^q — собственная частота системы на стадии q ; $v(t_{обр}^{q-1})$ — скорость массы в момент перехода от стадии $q-1$ к стадии q .

Для систем со многими степенями свободы, (2) преобразуется к виду (индекс номера стадии условно опущен):

$$u_k = \sum_{i=1}^j y_{ki} \cdot \left(A_i \cdot \sin \omega_i \cdot (-t_{обр}) + B_i \cdot \cos \omega_i \cdot (-t_{обр}) + \frac{1}{\omega_i^2} \cdot \frac{\sum_{p=1}^j F_p \cdot y_{pi}}{\sum_{p=1}^j m_p \cdot y_{pi}^2} \right) \quad (3)$$

где y_{ki} — постоянный множитель, равный перемещению массы k , соответствующий главной форме колебаний с частотой i ; A_i, B_i — постоянные интегрирования; j — общее число динамических степеней свободы; F_p — сумма статически приложенных сил к массе по направлению p -й степени свободы.

В целом, интерпретация инициирующего силового воздействия как приращения реакции поврежденной системы, позволяет отказаться от необходимости введения в уравнение дополнительных воздействий, изменяющихся по субъективно принятому закону, а также перейти к решению задачи о цепочке последовательных выключений элементов.

2. Выявлен и описан эффект уменьшения размаха колебаний при последовательном выключении элементов в движущейся системе, что повышает стойкость систем к прогрессирующему обрушению даже без учёта пластического ресурса материалов.

Дополнительное ускорение, приобретаемое массой в момент уменьшения жесткости системы и переходе от стадии $q-1$ к q всегда направлено вниз. При этом ускорение и скорость, накопленные к моменту выключения элемента в процессе колебательного процесса, зависят от характеристик системы. Мгновенные параметры движения в момент очередного отказа (выключения элемента) однозначно определяют размах колебаний на последующей стадии расчета, при этом амплитуда может как уменьшиться, так и, наоборот, возрасти.

Для простых одномассовых систем справедливо упрощенное представление этого эффекта на примере системы, представленной на рисунке 2а. Чем ниже оказывается положение массы в уже колеблющейся системе в момент очередного отказа, тем меньше будет амплитуда колебаний на последующей стадии и наоборот.

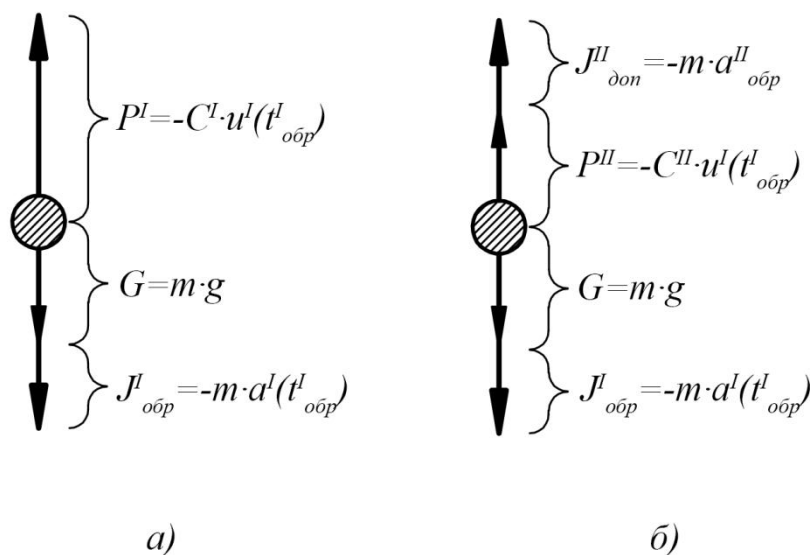


Рисунок 2 — Система сил, приложенных к движущейся массе в момент обрыва очередной пружины

Система сил, приложенных к системе с указанием направления инерционных сил до выключения элемента (рисунок 2а) и сразу после (рисунок 2б) отражает случай, когда отказ одной из пружин происходит в положении ниже статического равновесия, т.е. упругая реакции системы превышает вес массы. Отказ очередной пружины приводит к уменьшению размаха колебаний на последующей стадии. Как правило, такой случай наиболее вероятен, так как выключение нагруженных элементов имеет место при перемещениях, вызывающих максимум усилий в пружинах.

В общем случае, под системой из N независимых пружин можно понимать любую многоэлементную шарнирно-стержневую систему с одной динамической степенью свободы, например, изображенную на рисунке 3.

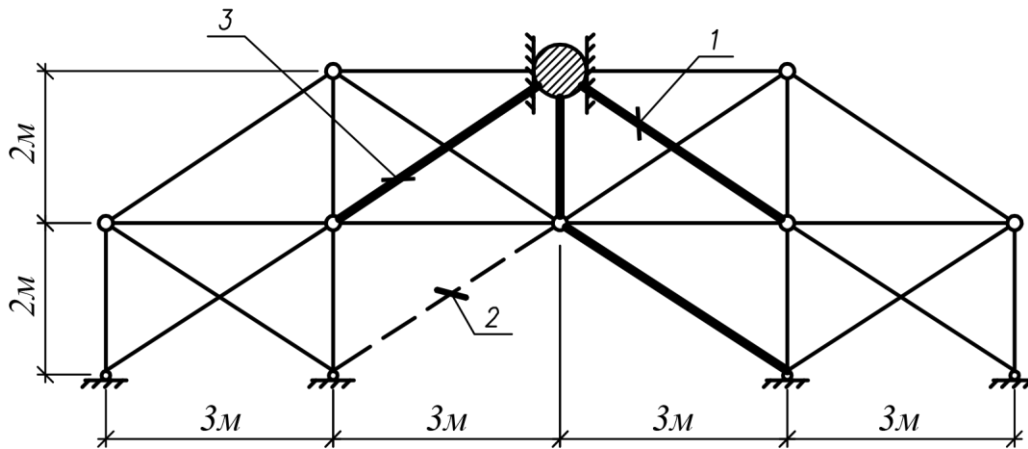


Рисунок 3 — Расчетная схема

Жесткостные характеристики системы сведены в таблицу 1:

Таблица 1 — Жесткостные характеристики системы

| Тип сечения элемента | Продольная жесткость, кН |
|----------------------|--------------------------|
| — | 707850 |
| - - - | 460638 |
| — | 110215 |

По условию задачи система покоится до момента мгновенного выключения элемента 1 (Стадия I). В процессе колебаний (Стадия II) происходит выключение элемента 2. Критерий выключения элемента 2 — достижение напряжений $\sigma_{обр}$. Вопрос устойчивости в рамках задачи не рассматривается. В зависимости от величины напряжения отказа, варьируется момент перехода к очередной стадии обрушения III. Чем позже происходит отказ, тем сильнее проявляется эффект гашения колебаний в движущейся системе. Результаты расчета представлены в виде двух графиков: перемещений по направлению динамической степени свободы (Рисунок 4) и напряжений в элементе 3 (Рисунок 5).

Обозначения, принятые на рисунках 4 и 5:

u — перемещения по направлению динамической степени свободы на стадии II; $u-20$, $u-25,5$, $u-33,1$ — то же, на стадии III, соответственно при напряжении изъятия $\sigma_{обр}$, равных 20кН/см², 25,5кН/см² и 33,1кН/см²; σ — напряжения в раскосе 3 на стадии II; $\sigma-20$, $\sigma-25,5$, $\sigma-33,1$ — то же, на стадии III, соответственно при напряжении изъятия $\sigma_{обр}$, равных 20кН/см², 25,5кН/см² и 33,1кН/см².

Все отрезки графиков, соответствующие состоянию II для наглядности продолжены и после момента времени $t=t_{обр}^{II}$.

В таблицу 2 сведено сравнение параметров для каждого расчетных случая.

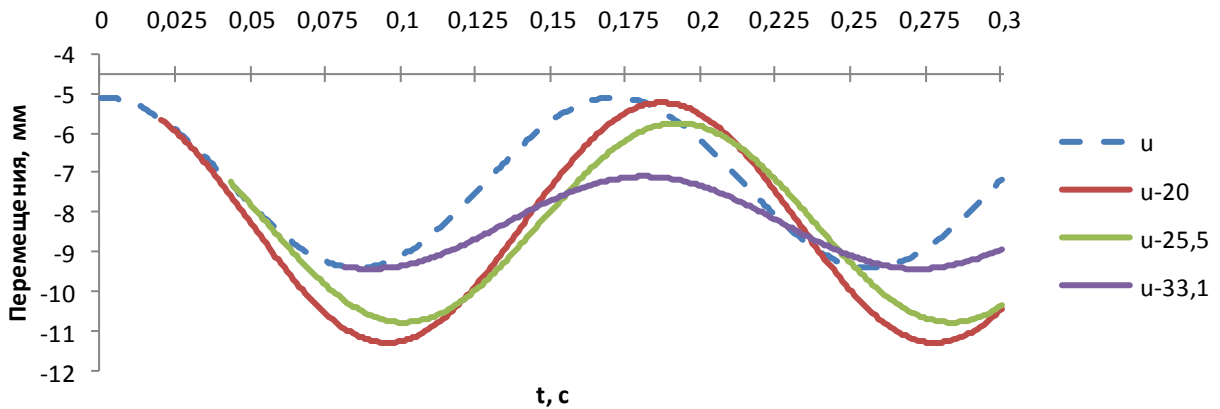


Рисунок 4 — График колебания массы m при разных критериях обрыва

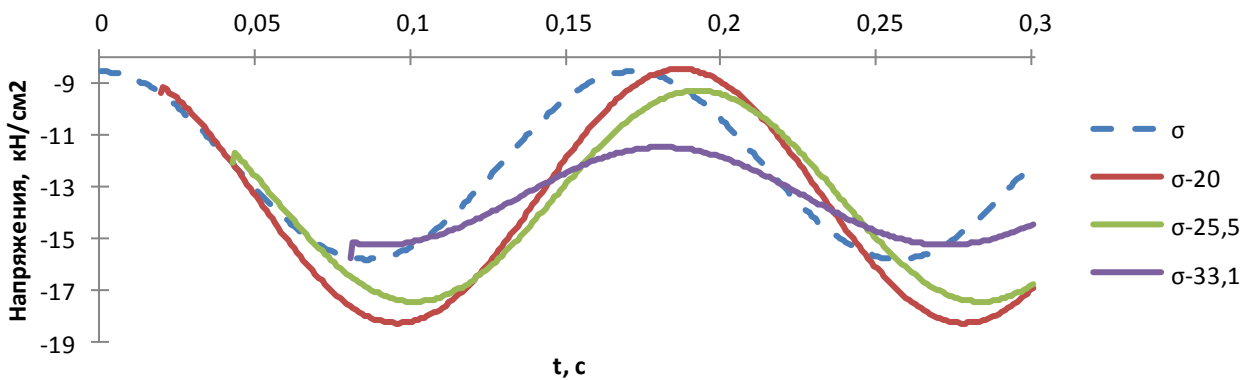


Рисунок 5 — Напряжения в раскосе 3 при разных критериях обрыва

Таблица 2 — Сравнение расчетных параметров системы

| Параметр | Стадия I | Критерий перехода к следующей стадии обрушения, $\sigma_{обр}$ | | |
|--|----------|--|----------------------------|----------------------------|
| | | 20,0 кН/см ² | 25,5 кН/см ² | 33,1 кН/см ² |
| Момент обрыва $t_{обр}^{II}$, сек. | - | 0,021 | 0,043 | 0,081 |
| Максимальное перемещение, мм | -9,41 | -11,307 | -10,794 | -9,438 |
| Относительно стадии 1 | - | 20,2% | 14,7% | 0,3% |
| Амплитуда колебаний, мм | 2,16 | 3,307 | 2,523 | 1,167 |
| Относительно стадии 1 | - | 53,1% | 16,8% | -46,0% |
| Макс.напряжение (раскос 3), кН/см ² | -15,836 | -18,304 | -17,472 | -15,278 |
| Относительно стадии 1 | - | 15,6% | 10,3% | -3,5% |

Приведенный пример наглядно демонстрирует эффект «разгона» колебаний при раннем выключении очередного раскоса ($\sigma_{обр}=20,0 \text{ кН/см}^2$) и их «гашения» при его отказе вблизи нижнего амплитудного значения ($\sigma_{обр}=33,1 \text{ кН/см}^2$). Такое упрощенное представление справедливо для систем с одной степенью свободы, для многомассовых систем, особенно несимметричных, эта зависимость будет несколько сложнее, тем не менее, эффект изменения размаха колебаний будет сохраняться.

3. Выведены в общем виде аналитические решения, применимые для экспресс-анализа реакции физически нелинейных систем на внезапное выключение связи или элемента.

Развитие вычислительных мощностей и программных комплексов в последние несколько десятилетий привело к тому, что использование численных методов расчета при динамическом анализе строительных конструкций с нелинейностями стало по сути безальтернативным. Однако, до сих пор их применение в повседневной инженерной практике остается затруднительным. Детальный численный расчет на экстремальные воздействия производится только для особо ответственных уникальных зданий. Кроме того, уверенное суждение о наборе элементов конструкции, выключение которых наиболее опасно с точки зрения последующего развития прогрессирующего обрушения, формируется после проведения серии расчетов с разными начальными повреждениями.

Для возможности предварительной экспресс-оценки последствий изъятия серии элементов из системы, можно воспользоваться методом малого параметра Линдштедта-Пуанкаре. Метод применим для конструкций, сводящихся к одномассовым и предполагает предварительное получение нелинейной зависимости упругая реакция-деформации и её аппроксимацию полиномиальной функцией.

Погрешность решения зависит от точности аппроксимации нелинейно-упругой реакции и количества учитываемых членов разложения по методу малого параметра. Для возможности использования в инженерной практике записаны два решения в общем виде:

— Аппроксимация упругой реакции полиномом 3-й степени и учет членов разложения при степенях малого параметра 0, 1 и 2.

— Аппроксимация упругой реакции полиномом 5-й степени и учет членов разложения при степенях малого параметра 0 и 1.

Общий вид уравнения движения:

$$m \cdot \frac{d^2 x^*}{dt^{*2}} + F(x^*) - G = 0 \quad (4)$$

где $F(x^*)$ — полиномиальная функция реакции системы.

Общий вид полиномиальной функции:

$$F(x^*) = B \cdot x^* + D \cdot x^{*3} + H \cdot x^{*5} \quad (5)$$

где B, D, H — постоянные.

Для укорочения дальнейшей записи введем постоянные:

$$\alpha = \frac{G}{B \cdot X^*}, \beta = \frac{H \cdot X^{*2}}{D} \quad (6)$$

где X^* — характерный линейный масштаб задачи.

$$\mu = \frac{D \cdot X^{*2}}{B} \quad (7)$$

где μ — малый параметр.

Решение при использовании полинома 3-й степени и учете членов разложения 0, 1, 2:

$$\begin{aligned} x \approx & A \cdot \cos(\omega \cdot t) + \alpha + \mu \cdot \left(\frac{A^3}{32} \cdot \cos(\omega \cdot t) + \frac{A^2 \cdot \alpha}{2} \cdot \cos(\omega \cdot t) - \right. \\ & \left. - \left(\frac{3}{2} \cdot A^2 \cdot \alpha + \alpha^3 \right) \right) + \mu^2 \cdot \left(- \left(\frac{31 \cdot A^4 \cdot \alpha}{32} + 2 \cdot A^2 \cdot \alpha^3 \right) \cdot \cos(\omega \cdot t) + \right. \\ & \left. + \left(\frac{3 \cdot A^3 \cdot \alpha^2}{32} - \frac{21 \cdot A^5}{1024} \right) \cdot \cos(\omega \cdot t) + \frac{A^4 \cdot \alpha}{32} \cdot \cos(\omega \cdot t) + \right. \\ & \left. + \frac{A^5 \cdot \alpha}{1024} \cdot \cos(\omega \cdot t) + \frac{15 \cdot A^4 \cdot \alpha}{8} + 6 \cdot A^2 \cdot \alpha^3 + 3 \cdot \alpha^5 \right) \end{aligned} \quad (8)$$

где A — постоянная интегрирования.

Частота колебаний:

$$\omega = 1 + \mu \cdot \left(\frac{3}{2} \cdot \alpha^2 + \frac{3 \cdot A^2}{8} \right) - \mu^2 \cdot \left(\frac{15 \cdot A^4}{256} + \frac{33 \cdot \alpha^4}{8} + \frac{69 \cdot A^2 \cdot \alpha^2}{16} \right) \quad (9)$$

Решение при использовании полинома 5-й степени и учете членов разложения 0, 1:

$$\begin{aligned} x \approx & A \cdot \cos(\omega \cdot t) + \alpha + \\ & + \mu \cdot \left(\left(\frac{A^2 \cdot \alpha}{2} + \frac{5 \cdot \beta \cdot A^2 \cdot \alpha^3}{3} + \frac{5 \cdot \beta \cdot A^4 \cdot \alpha}{6} \right) \cdot \cos(\omega \cdot t) + \right. \\ & \left. + \left(\frac{A^3}{32} + \frac{5 \cdot \beta \cdot A^5}{128} + \frac{5 \cdot \beta \cdot A^3 \cdot \alpha^2}{16} \right) \cdot \cos(\omega \cdot t) + \right. \\ & \left. + \left(\frac{\beta \cdot A^4 \cdot \alpha}{24} \right) \cdot \cos(\omega \cdot t) + \left(\frac{A^5 \cdot \beta}{384} \right) \cdot \cos(\omega \cdot t) - \right. \\ & \left. - \left(\frac{3}{2} \cdot A^2 \cdot \alpha + \alpha^3 + \alpha^5 \cdot \beta + \frac{15}{8} \cdot A^4 \cdot \alpha \cdot \beta + 5 \cdot \beta \cdot A^2 \cdot \alpha^3 \right) \right) \end{aligned} \quad (10)$$

Частота колебаний:

$$\omega = 1 + \mu \cdot \left(\frac{24 \cdot \alpha^2 + 6 \cdot A^2 + 60 \cdot \beta \cdot A^2 \cdot \alpha^2 + 40 \cdot \beta \cdot \alpha^4 + 5 \cdot \beta \cdot A^4}{16} \right) \quad (11)$$

Применение приведенных решений требует примерно равных вычислительных ресурсов. Общий алгоритм применения решений (8) и (10) при экспресс-оценке последствий изъятия элементов/связей из системы имеет вид:

1. *Статический расчет исходной системы.* Определение координаты по направлению главной степени свободы в положении статического равновесия.

2. *Выбор иницирующего повреждения.* Подбор элемента (-ов) и связи (-ей), изымаемых из системы.

3. *Статический расчет поврежденной системы с учетом физической нелинейности.* Получение истинной нелинейно-упругой реакции системы и начального возмущения.

4. *Аппроксимация реакции системы.* Запись коэффициентов полиномиальной функции — B, D, H .

5. *Динамический расчет.* Поиск значений функции перемещений и соответствующих усилий в элементах системы. Проверка выполнения условий прочности и устойчивости и окончательный анализ последствий выключения элементов/связей по расчетному сценарию.

4. Разработан метод динамического расчета физически нелинейных стержневых систем с выключающимися элементами, представляющий собой комбинацию положений линейно-спектральной теории и прямого численного интегрирования. Метод позволяет для каждого этапа деформирования конструкции применять положения той теории расчета, достоинства которой раскрываются в наибольшей мере. На основании разработанного спектрально-численного метода составлена программа в среде MathCad, апробированная на примере расчета покрытия павильона №5а ОАО «ЛЕНЭКСПО» на прогрессирующее обрушение.

Для ряда строительных конструкций, в первую очередь металлических, характерным типом отказа элемента в процессе нагружения при экстремальных воздействиях является потеря устойчивости. При этом напряжения в оставшихся элементах системы могут быть далеки от напряжений текучести. Для таких случаев рациональным становится применение линейно-спектрального расчета, основанного на разложении по собственным формам, ввиду меньшей, по сравнению с прямым интегрированием, трудоемкости вычислений, а также отсутствия эффекта накопления погрешности на каждой итерации, свойственного всем численным методам. Чем большее число стадий обрушения сменяется по достижении критических напряжений в сжатых элементах при отсутствии напряжений текучести в растянутых элементах, тем более эффективным становится применение аналитического линейно-упругого метода. Граница применения аналитического решения в форме разложения по собственным формам — переход какого-либо элемента системы в текучесть. С этого момента расчет следует вести с помощью прямых численных методов по явной схеме интегрирования. Разработанный в диссертации алгоритм предполагает использование метода Адамса и метода Рунге-Кутты 4-го порядка точности.

Если после отказа очередного элемента система становится геометрически изменяемой, расчет прекращается.

Укрупненный алгоритм расчета спектрально-численным методом представлен на рисунке 6.

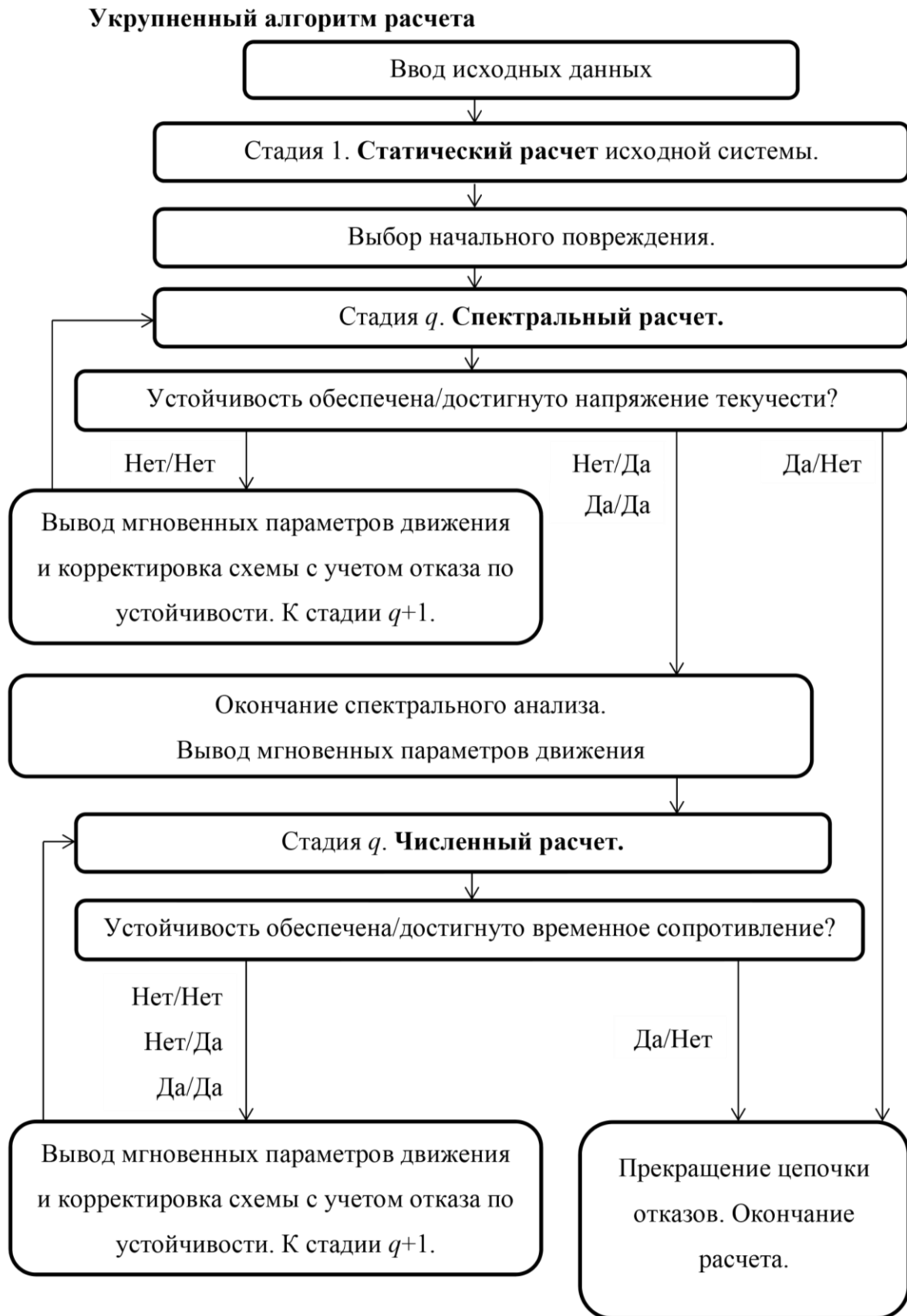


Рисунок 6 — Укрупненный алгоритма расчета спектрально-численным методом

Эффективность применения разработанного в диссертации алгоритма напрямую зависит от того, сколько стадий обрушения возможно рассчитать аналитически, применяя линейно-спектральный метод. Очевидно, что для этого в наибольшей степени подходят пространственные металлические конструкции, сечения элементов в которых подобраны в большинстве по условию предельной гибкости и способны терять общую устойчивость при напряжениях сжатия, абсолютная величина которых далека от предела текучести при растяжении. В таких системах критерий отказа каждого очередного элемента достигается в рамках выполнения положений теории упругого деформирования и, следовательно, возрастает число стадий расчета, не требующих использование трудоемкого прямого численного интегрирования.

В качестве верификационного примера в работе приведена серия расчётов реального покрытия павильона №5 ОАО «ЛЕНЭКСПО» по четырем расчетным сценариям, предполагающим разные иницирующие повреждения, комбинации нагрузок и коэффициент ξ , характеризующий степень уменьшения жесткости потерявшего устойчивость элемента в случае его сохранения в системе. Общий вид расчетной схемы представлен на рисунке 7. Общее число узлов — 225, элементов — 816. Стойки учтены в виде податливых связей в месте сопряжения с капителями.

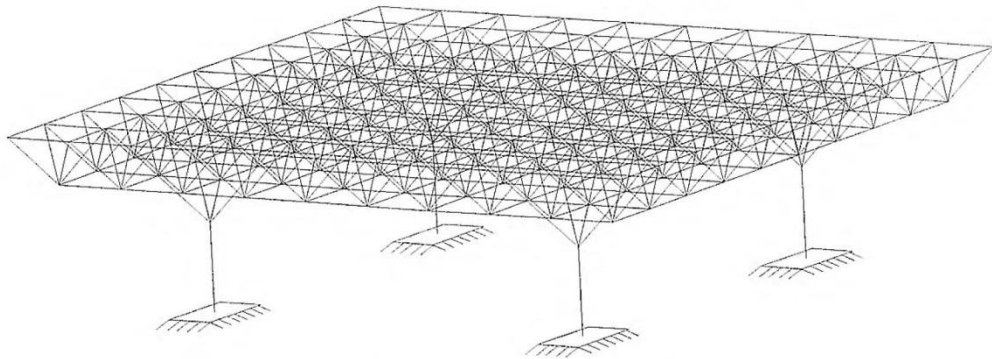


Рисунок 7 — Общий вид расчетной схемы

Сценарий 1: Отказ одного из элементов, образующего капитель. Сочетание нагрузок — пониженное (с учетом рекомендаций понижающих коэффициентов при расчете на сейсмическую нагрузку). $\xi=0,001$. Результат расчета: обрушение системы (потеря геометрической неизменяемости). 8 стадий расчета. Все стадии расчета — с применением линейно-спектрального метода.

Сценарий 2: Иницирующее повреждение и сочетание нагрузок — те же, что и в сценарии 2. $\xi=0,001$. Особое условие — наличие ослабления в наиболее растянутом элементе, снижающее площадь его поперечного сечения на 50%.

Результат расчета: обрушение системы (потеря геометрической неизменяемости). 14 стадий расчета. Конец стадии III — достижение напряжений текучести в ослабленном элементе. Стадии I-III — с применением линейно-спектрального метода. Стадии IV-XIV — с применением численного метода.

Сценарий 3: Отказ наиболее растянутого элемента поясов. Сочетание нагрузок — полное расчетное. $\xi=0,05$. Результат расчета: обрушение локализовано. 6 стадий расчета. Все стадии расчета — с применением линейно-спектрального метода.

Сценарий 4: Отказ наиболее сжатого элемента поясов. Сочетание нагрузок — полное расчетное. $\xi=0,05$. Результат расчета: обрушение локализовано. 3 стадии расчета. Все стадии расчета — с применением линейно-спектрального метода.

Для сценария 2, при котором используются оба метода расчета, приведены подробные результаты в виде графиков напряжений в элементах, связанных со сменой стадий расчета (первого, перешедшего в неупругую зону работы и всех, потерявших устойчивость), а также сводной таблицы 3.

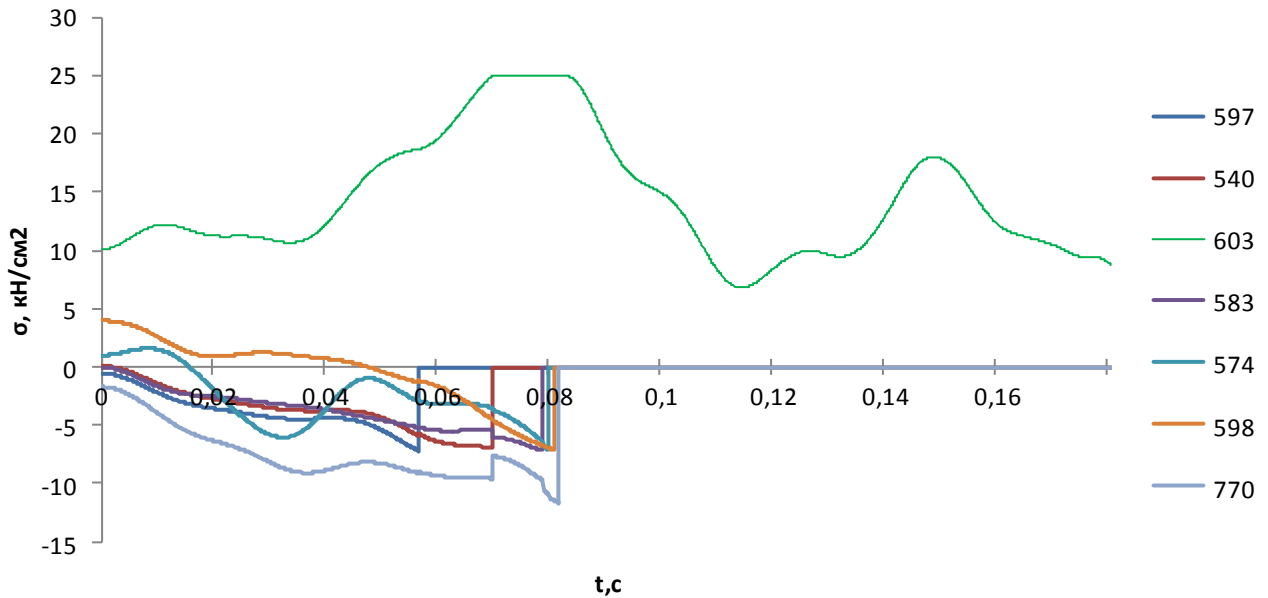


Рисунок 8 — Сценарий 2. Напряжения в элементах, связанных со сменой стадии расчета II-VII

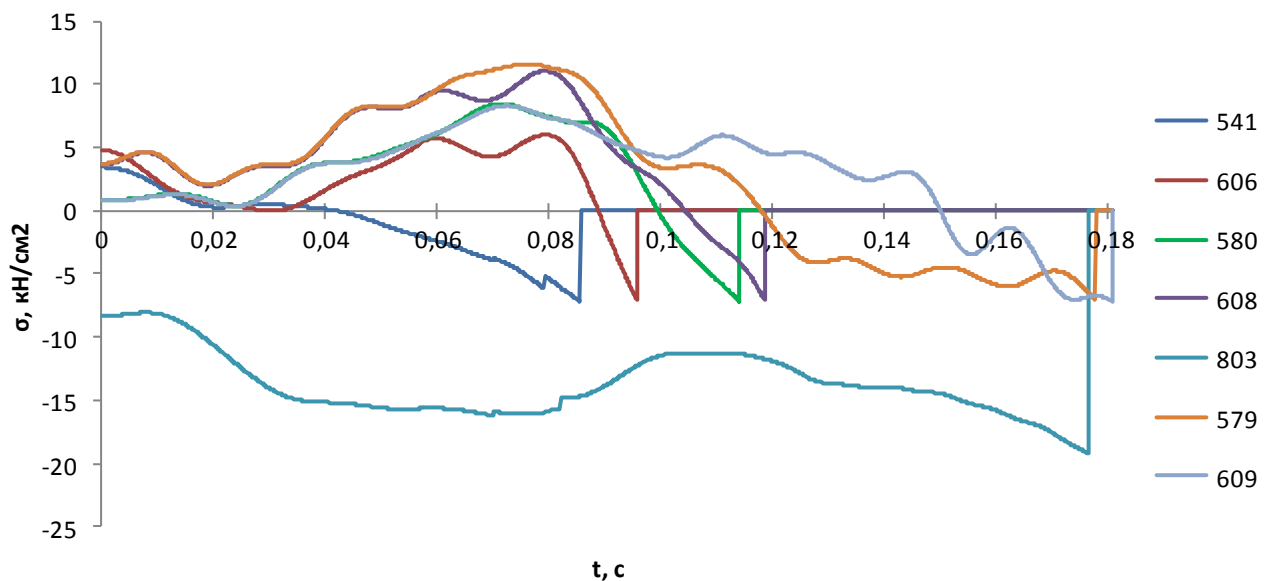


Рисунок 9 — Сценарий 2. Напряжения в элементах, связанных со сменой стадии расчета VIII-XIV.

Таблица 3 — Сводная таблица результатов расчета по сценарию 2

| Стадия обрушения | Метод расчета | Номер элемента | Тип элемента | Сечение | Время отказа, с | Тип отказа |
|--------------------------------------|---------------|----------------|------------------|---------|-----------------|---------------------|
| I | — | | Элемент капители | 114x5,5 | — | — |
| II | Спектральный | 597 | Нижний пояс | 60x3,5 | 0,0569 | Потеря устойчивости |
| III | Спектральный | 540 | Нижний пояс | 60x3,5 | 0,0700 | Потеря устойчивости |
| | | 603 | Верхний пояс | 60x3,5 | | Переход в текучесть |
| IV | Численный | 583 | Раскос | 60x3,5 | 0,0791 | Потеря устойчивости |
| V | Численный | 574 | Нижний пояс | 60x3,5 | 0,0802 | Потеря устойчивости |
| VI | Численный | 598 | Нижний пояс | 60x3,5 | 0,0813 | Потеря устойчивости |
| VII | Численный | 770 | Раскос | 76x4,0 | 0,0820 | Потеря устойчивости |
| VIII | Численный | 541 | Нижний пояс | 60x3,5 | 0,0857 | Потеря устойчивости |
| IX | Численный | 606 | Верхний пояс | 60x3,5 | 0,0959 | Потеря устойчивости |
| X | Численный | 580 | Верхний пояс | 60x3,5 | 0,1141 | Потеря устойчивости |
| XI | Численный | 608 | Верхний пояс | 60x3,5 | 0,1186 | Потеря устойчивости |
| XII | Численный | 803 | Элемент капители | 114x5,5 | 0,1767 | Потеря устойчивости |
| XIII | Численный | 579 | Верхний пояс | 60x3,5 | 0,1778 | Потеря устойчивости |
| XIV | Численный | 609 | Верхний пояс | 60x3,5 | 0,1809 | Потеря устойчивости |
| Потеря геометрической неизменяемости | | | | | | |

Для всех расчетных сценариев, не имеющих дополнительно введенных ослаблений в сечениях растянутых элементов (сценарии 1,3,4) инициирующие повреждения не приводят к возникновению напряжений текучести вплоть до прекращения обрушения (сценарии 3,4) или потери геометрической неизменяемости (сценарий 1). Как следствие, применение численного интегрирования не требуется для получения динамической реакции системы и оценки её стойкости к развитию прогрессирующего обрушения. Расчет по сценарию 2 приведен для демонстрации применения разработанных программы и алгоритма в расчетах, предполагающих переход от линейно-спектрального к численному методу в процессе анализа колебаний системы с выключающимися элементами.

5. Обоснованы критерии ограничения спектра значимых частот на этапе линейно-спектрального расчета для снижения ресурсоемкости алгоритма. Разработана методика отбора главных динамических степеней свободы для этапа численного интегрирования уравнения движения систем с выключающимися элементами.

Для класса задач на внезапное выключение элементов характерно исключительно малое время расчета на каждой стадии, необходимое для суждения: происходит очередной отказ или разрушение прекращается. Как правило, достаточным является временной отрезок, составляющий порядка двух периодов собственных колебаний системы по первой форме. Одновременно с этим возрастает влияние высших форм колебаний, которые обычно опускаются при решении смежных динамических задач строительной механики. При локальном отказе, являющимся иницирующим воздействием в задачах на прогрессирующее обрушение, значимыми становятся некоторые высшие формы, предполагающие большие относительные перемещения участка конструкции, близкого к выключенному элементу.

Однако, в реальных конструкциях учет всех форм колебаний нецелесообразен не только из-за возрастающей трудоемкости, но и ввиду быстрого затухания высших форм даже на учитываемом в расчете малом временном интервале. Предложено в задачах на прогрессирующее обрушение учитывать только те формы колебаний, собственная частота которых не превышает некоторой пороговой величины ω_{lim} . Ограничение спектра частот назначается исходя из двух критериев:

— *Заимствованный из теории сейсмостойкости.* Частота колебаний по высшей учитываемой форме не должна превышать ускорение нулевого периода, при котором конструкция начинает реагировать на возмущение как твердое тело.

— *Зависящий от геометрических размеров и материала конструкции.* Предлагается учитывать лишь те формы колебаний, за время одного периода которых между двумя наиболее удаленными узлами конструкции успевают пройти по крайней мере две продольные упругие волны.

Итоговое условие для нахождения пороговой частоты собственных колебаний имеет вид:

$$\omega_{lim} \leq \begin{cases} 2 \cdot \pi \cdot v_{унт} \\ \frac{\pi \cdot V_0}{2 \cdot L_{max}} \end{cases} \quad (12)$$

где $v_{унт} = 33Гц$ — ускорение нулевого периода; L_{max} — расстояние между двумя наиболее удаленными друг от друга узлами конструкции; V_0 — скорость распространения звука в материале.

Постоянство матрицы жесткости системы в пределах каждой стадии расчета позволяет использовать решение в нормальных координатах. Матрица масс системы в нормальных координатах:

$$\tilde{M} = [norm]^T \cdot M \cdot [norm] \quad (13)$$

где M — матрица масс в глобальных координатах; \tilde{M} — матрица масс в нормальных координатах; $[norm]$ — матрица, составленная из нормированных векторов перемещений по каждой из форм колебаний.

Размерность матрицы $[norm]$ — $DDF \times h$, где h — число собственных форм системы, частота которых не превышает ω_{lim} .

Реальные массы заменяются на некоторые приведенные величины, колеблющиеся по каждой из форм. Таким образом, вместо матрицы $[M]$ размерностью $DDF \times DDF$, можно ограничиться рассмотрением матрицы размерностью $h \times h$.

Схожие преобразования по приведению к нормальным координатам, разумеется, относятся и к остальным участвующим в расчете массивам. В диссертации представлены некоторые численные результаты, обосновывающие установленные критерии снижения числа значимых степеней свободы.

На этапе численного расчета использование записи в нормальных координатах становится нецелесообразным, так как требует решения задачи о собственных значениях в пределах каждой итерации. На этапе численного интегрирования в диссертации используется метод динамической конденсации по Гайяну. Принцип отбора главных степеней свободы (ГСС) для систем, покоящихся на момент внезапного выключения связи, известен: к ГСС относят те, которые обладают максимумом потенциальной энергии сразу после выключения связи.

Очевидно, что для рассматриваемых в диссертации систем, способных терять элементы в процессе колебаний, это условие следует преобразовать к максимуму полной механической энергии.

$$W_i = \left| m_i \cdot g \cdot \left(u_i^q - u_i^{q-1} \right) \right| + \frac{m_i \cdot \left(t_{обп}^{q-1} \right)^2}{2} \quad (14)$$

где W_i — полная механическая энергия системы по направлению i -й степени свободы.

При этом сумма механической энергии по направлению ГСС, должна составлять не менее 90% от полной энергии системы:

$$\sum_{i=1}^{DDF_{lim}} W_i \geq 0.9 \cdot W_{full} \quad (15)$$

где W_{full} — полная механическая энергия системы.

Однако, серия расчетов систем со многими степенями свободы указывает, что условие (15) необходимо дополнить. Те степени свободы, по направлению которых приложены внешние нагрузки, также должны в обязательном порядке быть включены в список главных.

Методика выбора количества и направления ГСС при использовании динамической конденсации принимает вид:

— *Выбор минимального количества ГСС.* Число степеней, относящихся к главным, должно быть не менее количества форм собственных колебаний, учитываемых на последней стадии линейно-спектрального расчета.

— *Поиск степеней свободы с максимумом полной механической энергии.* Определение полной механической энергии (14) для каждой степени свободы, сортировка в порядке убывания. Выбор первых DDF_{lim} степеней свободы в качестве ГСС.

— *Проверка условия о достаточности выбора.* В случае невыполнения условия (15) — последовательное добавление ранее отбракованных степеней до момента его удовлетворения.

— *Дополнение списка ГСС.* Если какие-либо степени свободы, по направлению которых в системе приложены внешние нагрузки, не попали ранее в список ГСС, их также следует отнести в разряд главных.

6. Разработан критерий оценки погрешности, проявляющейся в момент перехода от линейно-спектрального к численному расчету и способ её снижения.

Главной проблемой при использовании комбинации двух описанных выше методов расчета, является их корректное совмещение на границе применения каждого. Погрешность проявляется в резком скачке параметров колебаний на первой итерации численного расчета. Источника её возникновения два:

— *Влияние геометрической нелинейности.* Постоянство матрицы жесткости системы на этапе линейно-спектрального расчета (допущение о неизменности формы конструкции в пределах стадии).

— *Разные способы снижения числа динамических степеней свободы.* Описанные ранее приемы оптимизации для линейно-спектрального и численного методов отличаются по существу. Как следствие, результаты расчета при необходимости снижения числа динамических степеней свободы, не совпадают.

Оценку возникающей ошибки предложено вычислять исходя из относительной погрешности напряжений за одну первую итерацию:

$$\frac{\sum_{i=1}^N \left(\sigma_i^{r+1} \cdot \left(\sigma_{\text{бпр}}^r + \Delta\tau \right) \right) \cdot \left(\sigma_{\text{бпр}}^r \right)}{\sum_{i=1}^N \left(\sigma_i^r \cdot \left(\sigma_{\text{бпр}}^r \right) \right)} \cdot 100\% \leq \Omega \quad (16)$$

где N — общее число элементов системы; r — порядковый номер последней стадии обрушения, в рамках которой применялся линейно-спектральный метод расчета; $\Delta\tau$ — величина шага интегрирования по времени; Ω — критерий точности сопряжения двух методов расчета.

Величина критерия Ω устанавливается среди прочих исходных данных конкретной задачи.

Для снижения фактической Ω , на каждой стадии, в рамках которой расчет ведется линейно-спектральным методом, разработанный алгоритм предполагает выполнение разовой корректировки глобальной матрицы жесткости системы с учетом достигнутых перемещений на предшествующей стадии. Несмотря на то, что такой способ учета изменения формы системы является достаточно грубым ввиду редкой корректировки матрицы жесткости

(в отличие от прямого интегрирования, при котором корректировка происходит на каждой итерации), он позволяет уменьшить погрешность расчета. Кроме того, все стадии линейно-спектрального метода проходят в условиях упругого деформирования конструкции, априори предполагающего малые перемещения.

Если в момент достижения напряжений текучести (на стадии r) в одном из элементов условие (16) не выполняется, следует использовать один из следующих способов приемов для снижения влияния геометрической нелинейности:

- разбить стадию r на несколько;
- полностью заменить метод расчета на стадии r с линейно-спектрального на численный.

III ОБЩИЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

По итогам работы над диссертацией получены следующие результаты:

1. Проведен анализ современного состояния методов оценки живучести зданий в условиях экстремальных воздействий и решения частной задачи — расчета зданий на прогрессирующее обрушение, вызванное внезапным отказом элемента или связи. Сформулирована необходимость совершенствования динамических методов расчета, применяемых для оценки реакции сооружений в условиях аварийных воздействий. Для описанного класса задач указано на недостаточное использование в инженерной практике потенциала решения, использующего разложение по собственным формам колебаний.

2. Предложено интерпретировать иницирующее силовое воздействие, выводящее систему из равновесия в момент выключения элемента, как приращение реакции исходной и поврежденной систем по направлению динамической степени свободы. Указанное приращение равно по величине силе инерции, а связанное с последней ускорение можно использовать в качестве одного из начальных условий в решении уравнения движения.

3. Описан и исследован эффект уменьшения размаха колебаний в движущейся системе в случае, когда очередной отказ элемента происходит вблизи нижнего амплитудного положения массы. Приведен пример механической системы, в которой колебания гасятся за счёт последовательного выключения элементов. Полученный эффект справедлив для систем с одной степенью свободы, однако общий принцип изменения размаха колебаний будет сохраняться и в движущихся многомассовых системах с выключающимися элементами.

4. Для систем с одной динамической степенью свободы в общем виде записаны аналитические решения неоднородного дифференциального уравнения движения системы из нелинейно-упругого материала с выключающейся связью по методу малого параметра Линдштедта-Пуанкаре для вариантов аппроксимации упругой реакции полиномами 3-й и 5-й степеней. Полученные решения могут применяться в практических расчетах для проведения экспресс-оценки последствий изъятия элементов и связей из систем, сводящихся к одномассовым.

5. Разработан алгоритм комбинированного спектрально-численного метода расчета стержневых систем с выключающимися элементами, основным достоинством которого является использование решения в форме разложения по собственным формам колебаний на первых стадиях обрушения, что приводит к существенному повешению скорости счета, а также отсутствию накопления ошибки, присущей прямому численному интегрированию. Записаны основные принятые допущения метода, касающиеся его применения в практических расчетах.

6. Разработана методика отбора главных динамических степеней свободы на этапе численного интегрирования, предложены критерии установления достаточного числа учитываемых собственных частот на этапе использования линейно-спектрального метода

7. На этапе линейного деформирования систем учтено изменение формы конструкции путем корректировки матрицы жесткости в начале каждой стадии линейно-спектрального расчета. Учет геометрической нелинейности на этапе прямого численного интегрирования осуществляется непосредственно на каждой итерации.

8. Разработан критерий оценки погрешности сопряжения двух методов расчета в момент перехода от решения в форме разложения по собственным формам к прямому численному интегрированию.

9. На основании изложенного алгоритма разработана расчетная программа в среде MathCad, апробированная при анализе стойкости к прогрессирующему обрушению металлического структурного покрытия павильона №5а ОАО «ЛЕНЭКСПО».

IV ОСНОВНЫЕ НАУЧНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО ИССЛЕДОВАНИЯ:

Научные статьи, опубликованные в ведущих рецензируемых научных журналах и изданиях, определенных Высшей аттестационной комиссией Министерства образования и науки Российской Федерации.

1. **Бондарев, Ю. В.** Подходы к решению задачи о внезапном удалении элементов из стержневой системы [Текст] / Ю. В. Бондарев, И. С. Талантов // Вестник гражданских инженеров. — 2014. — № 2 (43). — С. 48-52 (0,63 / 0,315 п.л).

2. **Талантов, И. С.** Решения задачи о колебаниях одномассовых балок с нелинейной упругой характеристикой, подверженных внезапному удалению связи, методом малого параметра Пуанкаре [Электронный ресурс] / И. С. Талантов // Современные проблемы науки и образования. — 2014. — №5. URL: <http://www.science-education.ru/ru/article/view?id=15187> (дата обращения: 17.03.2016)

3. **Талантов, И. С.** Комбинированный спектрально-численный подход к решению задачи на внезапное удаление элементов на примере стального структурного покрытия. Часть 1. [Текст] / И. С. Талантов // Известия

петербургского университета путей сообщения. — 2015. — № 3(44). — С. 201-206 (0,75 п.л.).

4. **Талантов, И. С.** Комбинированный спектрально-численный подход к решению задачи на внезапное удаление элементов на примере стального структурного покрытия. Часть 2. [Текст] / И. С. Талантов // Известия петербургского университета путей сообщения. — 2015. — № 4(45). — С. 136-142 (0,81 п.л.).

5. **Талантов, И.С.** Динамический расчет систем с выключающимися элементами в процессе колебаний [Текст] / И. С. Талантов // Строительная механика и расчет сооружений. — 2016. — № 1(264). — С.39-47. (0,74 п.л.).

Публикации в других изданиях:

6. **Талантов, И. С.** Изучение динамических перемещений стержневых систем при внезапном удалении связи [Текст] / И. С. Талантов // Актуальные проблемы современного строительства: II междунар. конгресс 10-12 апреля 2013 г. / СПбГАСУ. — В 2 ч. Ч. II. — СПб, 2013. — С.161-164 (0,23 п.л.).

7. **Талантов, И. С.** О начальных условиях при расчете конструктивно нелинейных стержневых систем на удаление связей и элементов [Текст] / И. С. Талантов, Ю. В. Бондарев // Актуальные проблемы строительства и архитектуры: материалы 68-й Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов, молодых ученых и докторантов / СПбГАСУ. — В 2 ч. Ч. 1. — СПб, 2015. — С. 3-6 (0,26/0,13 п.л.).