ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ ИНСТИТУТ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ СИБИРСКОГО ОТДЕЛЕНИЯ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК КРАСНОЯРСКИЙ ФИЛИАЛ – СПЕЦИАЛЬНОЕ КОНСТРУКТОРСКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ БЮРО «НАУКА»

На правах рукописи

ФИЛИППОВА Юлия Федоровна

### ОЦЕНКА ЖИВУЧЕСТИ ПОВРЕЖДАЕМЫХ СТЕРЖНЕВЫХ КОНСТРУКЦИЙ

01.02.06 – Динамика, прочность машин, приборов и аппаратуры

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук

> Научный руководитель: канд. техн. наук, доцент, Доронин Сергей Владимирович

Красноярск – 2020

### оглавление

Вв	едение4
1	Повреждаемость и живучесть стержневых конструкций9
	1.1 Технические решения и нарушения работоспособности стержневых конструкций 9
	1.2 Понятия и показатели живучести силовых конструкций технических объектов 16
	1.3 Подходы к определению сценариев накопления повреждений и разрушения в
	исследованиях живучести
	1.4 Живучесть стержневых конструкций с позиций системного подхода
	1.5 Выводы по разделу 1 30
2 для	Анализ напряженно-деформированного состояния повреждаемых стержневых конструкций я оценки их живучести
	2.1 Базовая вычислительная модель статического упругого анализа
	2.2 Вычислительные модели физико-технических эффектов поведения повреждаемых
	стержневых конструкций
	2.3 Особенности и инженерная методика анализа напряженно-деформированного состояния
	повреждаемых стержневых конструкций в динамической постановке 45
	2.4 Апробация инженерной методики и сравнительный анализ напряженно-
	деформированного состояния повреждаемой пространственной стержневой конструкции в
	динамической и статической постановках 55
	2.5 Результаты и выводы по разделу 2
3	Оценка структурной живучести повреждаемых стержневых конструкций 66
	3.1 Методический подход к оценке структурной живучести 66
	3.2 Оценка структурной живучести пространственных силовых стержневых конструкций. 67
	3.3 Оценка структурной живучести колебательных систем стержневого типа
	3.4 Оценка структурной живучести прецизионных конструкций стержневого типа
	3.5 Результаты и выводы по разделу 3 101
4 эле	Оценка живучести повреждаемых структурно-сложных узлов сочленения стержневых ементов
	4.1 Подход к оценке живучести узлов сочленения
	4.2 Модели структуры и возможных взаимодействий узла сочленения для обоснования
	сценариев накопления повреждений105
	4.3 Разработка структуры логико-вычислительной модели анализа живучести и
	определение множества сценариев накопления повреждений

4.4 Обоснование количественных параметров и исследование ло	огико-вычислительной
модели анализа живучести узла сочленения	
4.5 Результаты и выводы по разделу 4	
Основные выводы	
СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ	
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	
ПРИЛОЖЕНИЕ А Сценарии аварийных разрушений стержневых констру	кций 160
ПРИЛОЖЕНИЕ Б Сценарии накопления повреждений в узле сочленения .	
ПРИЛОЖЕНИЕ В Акты о внедрении результатов исследования	

### Введение

Актуальность работы. К силовым конструкциям стержневого типа (стержневым конструкциям) относятся составляющие части машин, оборудования, инженерных сооружений в горной, нефтегазовой, химико-металлургической промышленности, строительстве, энергетике, технике связи, деформирование и разрушение которых изучается с использованием расчетных схем, моделей, методов механики стержней как одного из разделов механики деформируемого твердого тела. Свойства этих систем в поврежденном состоянии слабо изучены, в результате чего высока опасность непрогнозируемого их поведения, приводящего к тяжелым авариям и техногенным катастрофам. Степень этой опасности резко возрастает в экстремальных природно-климатических условиях Сибири и Севера.

Это подтверждается многочисленными фактами повреждений и разрушений конструкций стержневого типа, спроектированных в соответствии с действующими нормативными требованиями и классическими инженерными методами расчетов. Традиционно выполняемыми расчетами на прочность, жесткость, устойчивость, выносливость не удается полностью исключить возможность разрушений стержневых конструкций. Это обусловлено как возможным наличием в конструкциях повреждений различной природы и происхождения, так и превышением действующими нагрузками расчетных значений. Анализ свойств и поведения конструкций в таких состояниях и условиях составляет предметную область конструкционной живучести.

В настоящее время, несмотря на значительное количество отечественных и зарубежных публикаций в области конструкционной живучести, нет общепринятой точки зрения на природу и способы количественного и качественного оценивания живучести. Результаты многочисленных исследований в большинстве случаев не учитывают системных особенностей конкретных классов технических объектов и, как следствие, не позволяют анализировать все аспекты живучести в связи с конструктивной формой объекта. В полной мере это касается и конструкций стержневого типа.

В связи с вышесказанным актуальными являются системные обоснование и разработка технологий исследования живучести, включающих в себя определение специфических для стержневых конструкций показателей, критериев, методик оценки живучести при возникновении и накоплении повреждений вне зависимости от отраслевой принадлежности технических объектов. Эти технологии должны основываться на исследованиях напряженнодеформированного состояния конструкций, давать возможность оценивать живучесть в поврежденных состояниях. **Цель** заключается в разработке технологий оценки живучести стержневых конструкций для прогнозирования их поведения в поврежденном состоянии.

Для достижения этой цели необходимо решение следующих задач:

1) исследование напряженно-деформированного состояния стержневых конструкций при повреждении их структурных элементов для анализа их живучести;

2) формулировка и практическая апробация количественных показателей, критериев, методик оценки структурной живучести стержневых конструкций в связи с их функциональным назначением;

3) разработка и практическая апробация показателей и методики анализа живучести структурно-сложных узлов сочленения стержневых элементов в связи с расчетной и экспериментальной реализацией возможных сценариев их разрушения.

Объектом исследования являются повреждаемые стержневые конструкции машин, оборудования, инженерных сооружений как класс технических объектов.

**Предметом исследования** являются свойства стержневых конструкций в поврежденном состоянии, выражаемые количественными показателями живучести в связи с накопленным уровнем поврежденности.

**Методы исследования:** аналитические, численные, экспериментальные методы механики деформируемого твердого тела, методы вычислительного моделирования и системного анализа.

### Научная новизна работы заключается в том, что

предложены показатели, критерии и методики количественной оценки структурной живучести стержневых конструкций в связи с их функциональным назначением (обеспечение несущей способности, частотного спектра свободных колебаний, формостабильности) в составе технического объекта;

введены ранговые показатели и разработана методика анализа живучести повреждаемых структурно-сложных узлов сочленения стержневых элементов, основанные на определении и расчетно-экспериментальном исследовании сценариев накопления повреждений.

### На защиту выносятся:

количественные показатели, критерии, методики оценки структурной живучести силовых, колебательных, прецизионных конструкций стержневого типа;

ранговые показатели, критерии, методики оценки живучести структурно-сложных узлов сочленения стержневых элементов;

результаты исследования структурной живучести стержневых конструкций телекоммуникационного контейнера и мачты, колебательной системы бака высокого давления электрореактивных двигателей космических аппаратов, силового каркаса крупногабаритного рефлектора зеркальной антенны наземных систем спутниковой связи;

структура и результаты исследования логико-вычислительной модели деформирования и разрушения повреждаемого структурно-сложного узла сочленения стержневых элементов каркаса рефлектора.

Соответствие диссертации научной специальности. Диссертация соответствует паспорту специальности 01.02.06 – «Динамика, прочность машин, приборов и аппаратуры» в части:

формулы специальности – в пункте «...изучающая методами механики и вычислительной математики поведение технических объектов различного назначения...»;

целей изучения закономерностей и связей, динамических процессов, напряженного состояния и прочности машин, приборов и аппаратуры – в пункте «обеспечения эффективности, надежности и безопасности машин, приборов и аппаратуры на всех стадиях жизненного цикла...»;

областей исследования – в пунктах «1. Динамика машин, приборов, аппаратуры, систем и комплексов машин и приборов», «9. Математическое моделирование поведения технических объектов и их несущих элементов при статических, динамических, тепловых, коррозионных и других воздействиях».

Личный вклад автора заключается в постановке (совместно с научным руководителем) и реализации цели и задач исследования, сборе и анализе данных по авариям стержневых конструкций, разработке технологий и проведении исследований напряженно-деформированного состояния и живучести, обработке и анализе результатов.

Достоверность полученных результатов обеспечивается сбором и анализом фактических данных по разрушениям и авариям стержневых конструкций, применением теоретически обоснованных и практически апробированных моделей и методов механики деформируемого твердого тела, алгоритмического и программного обеспечения конечно-элементного анализа, проведением экспериментальных исследований повреждений структурных элементов узла сочленения.

**Практическая значимость работы** заключается в том, что созданы предпосылки и работающий инструментарий для изучения свойств конструкции в поврежденном состоянии на ранних стадиях ее жизненного цикла, обоснованы, разработаны, апробированы технологии анализа живучести, которые могут быть применены к произвольным стержневым конструкциям независимо от их отраслевой принадлежности; получены количественные оценки живучести стержневых конструкций ряда перспективных технических объектов (крупногабаритных прецизионных антенн наземных систем спутниковой связи, колебательной системы ксенонового бака высокого давления электрореактивного двигателя космического аппарата).

Внедрение результатов исследований осуществлено в ОАО «Красноярский машиностроительный завод» (ОАО «Красмаш») при проектных расчетах конструкций телекоммуникационного контейнера-аппаратной для размещения технологического оборудования, в ресурсном центре коллективного пользования СибГУ «Космические аппараты и системы» при выполнении многовариантного статического и динамического анализа зеркальной антенны наземных систем спутниковой связи, о чем имеются соответствующие акты внедрения.

Апробация работы. Основные результаты работы докладывались на: XII Всероссийской конференции молодых ученых по математическому моделированию и информационным технологиям. (Новосибирск, 2011); XXIII Международной инновационно-ориентированной конференции молодых ученых и студентов (МИКМУС 2011) (Москва, 2011); IX Всероссийской конференции молодых ученых «Проблемы механики: теория, эксперимент и новые технологии» (Новосибирск, 2012); IV Всероссийской конференции «Безопасность и живучесть технических систем» (Красноярск, 2012); Пятой Международной конференция «Системный анализ и информационные технологии» (САИТ-2013) (Красноярск, 2013); VI Евразийском симпозиуме по проблемам прочности материалов и машин для регионов холодного климата «EURASTRENCOLD-2013» (Якутск, 2013); II Всероссийской научно-техническая конференции молодых ученых, аспирантов и студентов с международным участием «Высокие технологии в современной науке и технике» (Томск, 2013); V Международной конференции «Деформация и разрушение материалов и наноматериалов» (Москва, 2013); XIV Всероссийской конференции молодых ученых по математическому моделированию и информационным технологиям (Томск, 2013); Х Всероссийской конференции молодых ученых «Проблемы механики: теория, эксперимент и новые технологии» (Новосибирск, 2014); XXII Байкальской Всероссийской конференции с международным участием «Информационные и математические технологии в науке и управлении» (Иркутск, 2017); XXI Международной научно-практической конференции «Решетнёвские чтения» (Красноярск, 2017); 11 Международной конференции «Mechanics, Resource and Diagnostics of Materials and Structures» (MRDMS 2017) (Екатеринбург, 2017); 12 Международной конференции «Mechanics, Resource and Diagnostics of Materials and Structures» (MRDMS 2018) (Екатеринбург, 2018); VI Всероссийской конференции «Безопасность и мониторинг техногенных и природных систем» (Красноярск, 2018); Ш Международной научно-технической конференции «Mechanical Science and Technology Update (MSTU-2019)» (Омск, 2019); XIII Международной IEEE научно-технической конференции «Динамика систем, механизмов и машин» (Омск, 2019); научно-практических семинарах СКТБ «Наука» ИВТ СО РАН, Красноярск.

**Объем работы.** Диссертационная работа состоит из введения, 4-х глав, основных выводов, списка сокращений и условных обозначений, списка литературы (242 источника) и 3-х приложений. Работа изложена на 183 страницах, включая 80 рисунков и 13 таблиц.

Публикации. Результаты исследований изложены в 21 научных работах, из которых 3 статьи в ведущих рецензируемых научных журналах и изданиях, рекомендованных ВАК РФ и 4 в международных базах данных, индексируемых Web of Science, Scopus.

Автор выражает благодарность к.т.н., научному сотруднику лаборатории вычислительной механики и риск-анализа Красноярского филиала ИВТ СО РАН Е.В. Москвичеву за помощь в проведении экспериментов по разрушению элементов узла сочленения стержневого каркаса и предоставленные результаты экспериментальных исследований механических свойств композитных материалов.

### 1 Повреждаемость и живучесть стержневых конструкций

# 1.1 Технические решения и нарушения работоспособности стержневых конструкций

В технике чрезвычайно широко распространены силовые конструкции, содержащие элементы (детали), один размер (длина) которых существенно превышает остальные. Такие конструкции применяются в машинах, оборудовании, инженерных сооружениях объектов техносферы, к которым относятся: экскаваторы [20, 27, 40, 62, 69, 130], рамы автосамосвалов [55, 100, 128], буровые вышки [5, 12, 105, 113] (добывающие отрасли); мачты [28, 48, 147, 148], контейнеры [16, 48, 174], мосты [24, 110, 125, 126], эстакады [16, 48, 99, 110], каркасы зданий [114, 165, 174], ледостойкие буровые комплексы [122] (строительство); вышки ЛЭП [48, 97, 156, 165] (энергетическая отрасль); параболические решетчатые антенны [13, 139, 187] (связь); металлоконструкции трубчато-балочных мостовых перегружателей [15, 82, 110, 127] (общетехническое оборудование). Многие конструктивные решения этих объектов являются типовыми, хорошо проработаны, изучены и описаны в ряде обобщающих монографий [46-48, 70, 97, 99, 110, 113, 114, 171, 172].

Элементы этих конструкций характеризуются большим разнообразием поперечных сечений, применяемых материалов, способов соединения (конструкций узлов сочленения). Жесткость узлов сочленения находится в диапазоне от нуля (что соответствует модели шарнирного соединения) до весьма больших значений (практически нулевая податливость, соответствующая модели жесткой заделки).

Вследствие большого разнообразия соединяемых элементов конструкции узлы сочленения выполняются сварными [11, 22, 46, 74, 107, 111, 165], болтовыми [11, 22, 23, 46, 74, 111, 165], заклепочными [11, 22, 23, 46, 74, 165] или клеевыми [38, 79, 80, 182]. Существенными особенностями обладают узлы сочленения композитных элементов конструкций: механические соединения имеют существенный недостаток, связанный со сверлением отверстий под болты и заклёпки, что приводит к перерезыванию волокон, концентрации напряжений в месте постановки болтов и ослаблении прочности и жесткости конструкции в этом месте [26, 36, 37, 41, 137, 151, 153]. Невозможность сварки композитных материалов (КМ) оставляет лишь два варианта крепления: склеиванием и с помощью крепежа (заклепок, болтов, винтов). Последний вариант более надёжен при длительной эксплуатации [144].

Несмотря на разнообразие конструктивных решений элементов конструкций и узлов сочленения, все указанные технические объекты обладают рядом системообразующих признаков (таблица 1.1), позволяющих отнести их к стержневым системам и использовать для их расчета и проектирования хорошо развитые методы строительной механики стержневых конструкций [136, 141, 149, 154, 186, 190]. При этом во многих случаях остается под вопросом степень обоснованности использования расчетных схем стержневого типа применительно к отдельным объектам и адекватность получаемых с их помощью результатов.

Таблица 1.1 – Характеристика системообразующих факторов стержневых конструкций в рамках методологии строительной механики

Факторы	Характеристика
Элементы	1. Балки, воспринимающие осевые усилия, изгибающие и крутящие моменты
	2. Стержни, воспринимающие только осевые усилия
	3. Гибкие нити, воспринимающие только растягивающие осевые усилия
	4. Арки, работающие в условиях распора
Опоры	1. Ограничивающие одну степень свободы (шарнирно-подвижная опора)
	2. Ограничивающие две степени свободы (шарнирно-неподвижная опора)
	3. Ограничивающие три степени свободы (жесткая заделка)
	4. Частично ограничивающие степени свободы по заданному закону (упругое ос-
	нование)
	5. Односторонние связи, ограничивающие степени свободы по одному направле-
	НИЮ
Соединения	1. Шарнирные соединения, передающие только осевые усилия и формирующие
элементов	ферменную стержневую систему
	2. Жесткие соединения, передающие осевые усилия, изгибающие моменты и фор-
	мирующие рамную стержневую систему
Конструктивная	1. Плоские системы, воспринимающие нагрузки только в своей плоскости
схема	2. Пространственные системы, воспринимающие нагрузки произвольного направ-
	ления
	3. Статически определимые системы, для расчета которых достаточно рассмотре-
	ние условий равновесия
	4. Статически неопределимые системы, содержащие лишние связи, требующие
	при расчете рассмотрения не только уравнений равновесия, но и уравнений, выте-
	кающих из деформированного состояния системы

В рамках этих методов выполняются расчеты на прочность, жесткость и устойчивость. Предполагается длительная безотказная работа конструкций, спроектированных с использованием таких расчетов. Однако, открытым остается вопрос о достаточности расчетов на прочность, жесткость и устойчивость для обеспечения работоспособности в течение всего жизненного цикла технического объекта.

Для определенности и однозначности используемой далее терминологии рассмотрим основные понятия, характеризующие различные состояния нарушения работоспособности. К наиболее часто используемым понятиям относятся повреждения, разрушения, аварии, катастрофы. Границы между смысловым содержанием этих понятий довольно размыты. Обратимся к литературным и нормативным источникам.

Поскольку понятие «повреждение» оказывается важнейшим при исследовании и

обеспечении работоспособности, прочности, надежности, необходима терминологическая ясность в его содержании. Известны следующие подходы в определении и трактовке этого понятия:

- поврежденное место, место поломки, порчи, неисправность [118];

- разрушение, поломка, порча [173];

– отклонение качества, формы и фактических размеров конструкции от требований нормативных документов или проекта, возникающие в процессе эксплуатации конструкции. Источником повреждений являются дефекты, полученные на стадии изготовления, транспортировки и монтажа, или в результате воздействий в процессе эксплуатации [99, 117, 119, 157];

 – событие, заключающееся в нарушении исправного состояния объекта в эксплуатации при сохранении работоспособного состояния [50, 133];

 неблагоприятное изменение состояния конструкции, которое может повлиять на ее функционирование [215];

- случайное изменение, нарушающее нормальный режим работы [163].

Приняв за основу позицию ISO 13822:2010, под повреждением в дальнейших рассуждениях понимаем изменение состояния объекта, которое может неблагоприятно повлиять на функционирование. Такая трактовка является достаточно общей и позволяет учесть все аспекты нарушения работоспособности. При этом она не накладывает никаких ограничений на природу процессов, приводящих к этому нарушению.

Рассмотрим далее особенности смыслового содержания понятия «разрушение», содержащиеся в авторитетных источниках:

«разрушение материала – макроскопическое нарушение сплошности материала в результате тех или иных воздействий на него. По времени и результатам протекания различают начальное разрушение (образование и развитие пор, трещин и др.) и полное разрушение (разделение тела на части)» [77];

«разрушение – нарушение сплошности материала, его разрыв, приводящий к образованию новых поверхностей» [43];

«если действующее на твердое тело усилия достаточно велики, то пройдя некоторую стадию деформирования, тело разрушается, т.е. теряет свою целостность – распадается на отдельные части» [121];

«разрушение конструкции – заключительная стадия работы нагруженной конструкции, характеризующаяся исчерпанием ее прочности и работоспособности вследствие ... нарушения целостности силовых элементов или механических связей между ними» [78, 150]. На основании этого сформулируем следующее содержание понятия. Разрушение – процесс, а также следствие процесса нарушения целостности

 конструкционного материала (нарушение его сплошности и образование новых поверхностей);

- элементов (деталей) конструкции (разделение их на части);

- конструкции (разрыв связей между элементами конструкции).

Таким образом, можно рассматривать иерархию разрушения конструкции как системы, в которой разрушение элементов конструкции включает в себя разрушение конструкционного материала, а разрушение конструкции – разрушение элемента конструкции.

Под аварией в соответствии с [175] будем понимать «разрушение сооружений и (или) технических устройств, применяемых на опасном производственном объекте ...»

В свою очередь, катастрофа [134] – «крупное неблагоприятное событие (авария, стихийное бедствие), влекущее за собой трагические последствия (разрушения, гибель людей, животных, растительного мира)».

Таким образом, основное, принципиальное отличие в смысловом содержании рассматриваемых понятий заключается в масштабе происходящих процессов и их последствий. Иерархическая взаимосвязь этих понятий выражается логической цепочкой: повреждение  $\rightarrow$  разрушение  $\rightarrow$  авария  $\rightarrow$  катастрофа.

Несмотря на высокий уровень развития строительной механики и методов расчета стержневых конструкций, при их эксплуатации наблюдаются многочисленные аварии и катастрофы. В литературе содержится описание аварий и катастроф *мостов* [10, 60, 184, 189], *эстакад* [18], *зданий* [60, 152, 184, 188, 189], *опор линий электропередач* [10, 18] и др. Рассмотрим некоторые примеры таких аварий.

Серьезная авария произошла при строительстве стальных мачт высотой 181 м в декабре 1952 г. [18]. Из системы 13 мачт обрушилось 8. Устойчивость обеспечивалась 4 ярусами 3гранных растяжек. При монтаже мачт устанавливались временные расчалки. При расследовании установлено, что разрушение началось с шестой мачты на высоте 66 м из-за сильного порывистого ветра и снегопада. Мачта упала в направлении ветра и перебила временные расчалки и растяжки седьмой мачты и в результате повалила ее.

Крупная авария галереи произошла из-за неправильного выполнения закрепления ферм, предусмотренного в проекте в чертежах металлоконструкции [18]. Проект галереи, включая чертежи стальных конструкций, был разработан институтом Приднепровский Промстройпроект в 1962 г. При разработке чертежей металлоконструкции опорные планки поместили на одном месте с опорой, не указав на необходимость приварки их по опорам и к нижним поясам ферм. Монтажные болты были поставлены не полностью и в отверстия большего диаметра, чем по проекту. Причиной данной аварии явилась грубая ошибка, допущенная при разработке чертежей металлоконструкции галереи из-за неосознанной конструктором и инженером, проверяющими чертеж, важности надежного прикрепления промежуточной опорной планки к нижним поясам ферм и опорному столику опоры.

Тяжелая авария шагающего экскаватора ЭШ-40/85 на разрезе "Ерковецкий" ОАО "Дальвостуголь" произошла в августе 1998 г. (рисунок 1.1) [65]. Экскаватор был введен в эксплуатацию в мае 1997 г. и выполнял горные работы до 9 мая 1998 г., когда произошел обрыв правого подъемного каната. В связи с отсутствием канатов диаметром 64 мм экскаватор находился в простое по 14 августа 1998 г. После запасовки канатов экскаватором выполнялась переэкскавация грунта до 16 августа 1998 г., когда произошла крупная авария, характеризующаяся следующим сценарием развития аварийной ситуации: разрыв левого подкоса стрелы на две части по сварному шву; динамическая передача всей нагрузки подкоса на ванты, при которой произошел обрыв проволок наружного слоя канатов с последующим вырывом канатов из заделок; деформация и разрушение элементов фермы надстройки.

Возникновению аварии способствовали следующие обстоятельства. Во-первых, было допущено нарушение ряда правил технической эксплуатации. Примерно 30% фонда рабочего времени горные работы выполнялись экскаватором с неработающей системой защиты стрелы от растяжки, предназначенной для защиты металлоконструкций стрелы от перегрузок. В течение весны 1998 года разработка сезонно мерзлых грунтов выполнялась без предварительного рыхления взрыванием. При этом угол откоса рабочего борта составлял 65-75° при предусмотренном проектом ведения горных работ угле 40°. Во-вторых, важную роль в формировании аварии сыграло наличие технологических дефектов. Обнаружены поры и непровары в разрушившемся сварном шве. Аварийная нагрузка вследствие разрушения подъемного каната привела к скачкообразному переходу группы технологических дефектов в первичную трещину, поверхности которой в условиях влажного теплого климата подвергались интенсивной коррозии.



Рисунок 1.1 – Картина аварии шагающего экскаватора ЭШ-40/85

Из рассмотрения аварий и катастроф вытекает, что они, как правило, развиваются во времени, включают в себя много событий и явлений, взаимодействующих и порождающих друг друга. В связи с этим целесообразно рассматривать сценарии повреждений, разрушений, аварий и катастроф. В настоящее время под сценариями понимаются

– «логическая последовательность взаимосвязанных состояний объекта или сложной технической системы, возможных при внешних воздействиях ...» [129, 140];

- «последовательность, состоящая из опасной ситуации, причины и последствия» [54].

Сделана попытка представить выше изложенные и другие аварии структурнологическими схемами, отражающими сценарии развития аварийных разрушений (Приложение А). На этих схемах снизу-вверх показано развитие аварийных ситуаций во времени. Можно выделить несколько фаз развития аварийной ситуации как самостоятельных этапов ее развития. Первая фаза, как правило, формируется элементарными событиями. На более поздних фазах события становятся более сложными и формирующими предельное состояние.

Рассмотрение построенных структурно-логических схем показывает, что авария может развиваться в течение длительного времени, в этом случае она отражается разветвленной диаграммой, отражающей причинно-следственную цепочку событий, приведших к данной аварии. В других случаях длина этой цепочки событий коротка.

Таким образом, на этом этапе исследования аварий и разрушений можно утверждать, что любая авария может быть представлена формальной структурно-логической схемой (сценарием), отражающей причинно-следственную взаимосвязь и закономерность ее формирования.

На основании статистических данных по катастрофическим разрушениям высотных теле-, радиомачт и башен, как в России, так и за рубежом за последние 100 лет [18, 28, 181, 224], выполнен анализ причин и условий аварий мачтовых и башенных сооружений, который показывает устойчивый рост (рисунок 1.2) природных и техногенных катастрофических аварий, и инцидентов, наносящих колоссальный экономический и социальный ущерб, создающих угрозу жизни людей. При этом причины этих событий таковы (таблица 1.2), что лишь часть связанных с ними факторов являются предметом проектного анализа, а значительная часть событий, формирующих причинно-следственный комплекс экстремальных воздействий, не рассматриваются в качестве исходных данных при формировании расчетных случаев нагружения.



Рисунок 1.2 – Общее число катастроф мачт и башен в течение столетия

Таким образом, нерегламентированные воздействия климатических и человеческого факторов оказывают значительное разрушающее воздействие на такие конструкции. При этом, как видно из таблицы, лишь часть воздействий, приводящих к катастрофическим разрушениям, учитывается действующей нормативной базой.

N⁰	Причины	%
1	Ветровые и климатические воздействия	34,35
2	Обледенение, лед	16,76
3	Столкновение с самолетом, вертолетом, крушения, авиакатастрофы	12,96
4	Ошибки при техническом обслуживании, тестировании оборудования	9,35
5	Терроризм	6,18
6	Неверный выбор материала	5,55
7	Повреждения оттяжек	3,77
8	Неустановленные причины	2,77
9	Пожар	1,85
10	Ошибки монтажа	1,85
11	Восстановительные, реставрационные работы	1,85
12	Землетрясение	0,92
13	Падение деревьев	0,92
14	Бомбардировки (войны)	0,92
	Всего	100

Таблица 1.2 – Причины катастрофических разрушений высотных теле-, радиомачт и башен

Таким образом, систематический анализ аварийных разрушений и катастроф силовых стержневых конструкций технических объектов свидетельствует о том, что при всем разнообразии причин и условий формирования и развития аварийных ситуаций практически всегда они характеризуются наличием следующих признаков (одного или нескольких):

 нештатные внешние активные или реактивные воздействия, формирующие запроектные условия нагружения;

- наличие дефектов той или иной природы в стержневых элементах или узлах их сочле-

нения;

 каскадный, многоэтапный характер развития повреждений и разрушения, при котором разрушение одних стержневых элементов приводит к перегрузке других и последующему их разрушению.

При этом принципиально важно отметить, что во многих случаях возникновение локального дефекта или частичного разрушения не означает мгновенной потери работоспособности: она может сохраняться, хотя и в ограниченном объеме, еще достаточно длительное время.

Указанные признаки предположительно свидетельствуют о том, что знаний предметной области классической механики стержней недостаточно для прогнозирования и предотвращения аварийных разрушений в реальных условиях техносферы. Необходима разработка более детального подхода к анализу причинно-следственного комплекса формирования аварий и разрушений, позволяющего более четкую формализацию аварийных ситуаций и открывающего возможность количественного прогнозирования аварийных разрушений [30<sup>1</sup>].

### 1.2 Понятия и показатели живучести силовых конструкций технических объектов

Одним из отрицательных проявлений индустриального развития общества является увеличение количества и тяжести аварий, разрушений, техногенных катастроф. Частично это выражается в возникновении фактически специального жанра научно-технической литературы, посвященного условиям, причинам и обстоятельствам их возникновения [1, 4, 10, 18, 60, 73, 76, 87, 92, 143, 184 и др.]. Впервые термин «живучесть» в связи с наличием повреждений был употреблен адмиралом С.О. Макаровым, который под живучестью понимал способность судна продолжать бой, имея повреждения в различных боевых частях [106]. Долгое время этот термин употреблялся только в судостроении [85, 169 и др.], причем с течением времени под живучестью стали понимать способность противостоять не только боевым, но и аварийным повреждениям, которые не связаны с воздействием боевых средств противника [85].

Активизация интереса к живучести конструкций и начало систематических исследований в этой области обусловлены результатами расследования причин известной аварии 22этажного жилого панельного дома *Roman Point в Лондоне* (1968 г.), обрушениями, вызванными террористическими атаками 19.04.1995 г. на здание *Murrah Building в Оклахома Сити* и 11.09.2001 г. на *башни Центра мировой торговли в Нью-Йорке* [123]. Анализ этих и других крупных аварий и катастроф привел к возникновению понятия «прогрессирующего обрушения (разрушения)» и осознанию того факта, что это явление не может быть полностью описано в

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> В публикации [30] результаты, полученные соискателем лично, составляют 100 % от объема всей публикации.

рамках традиционных научно-технических парадигм и методов проектирования и расчета силовых (несущих) конструкций: требуются принципиально новые подходы и методы. В связи с этим развивались как теоретические основы системной теории живучести безотносительно специфики объектов [56, 59, 93-95, 101, 108, 109, 164, 185], так и регулярные исследования в области живучести отдельных классов, типов и экземпляров технических объектов. Рассмотрим отраслевую специфику трактовки живучести некоторых типов объектов.

В энергетике живучесть – свойство объекта противостоять возмущениям, не допуская их каскадного развития с массовым нарушением питания потребителей [83, 84], сохранять работоспособность тепловых сетей в аварийных ситуациях, а также после длительных (более 54 часов) остановок [176]; свойство и способность реализации метрологического и технологического нормативного аспектов жизнедеятельности тепловых электростанций вблизи и за пределом паркового ресурса [75].

Под живучестью информационно-вычислительных систем понимают свойство сохранять во времени в установленных пределах способность выполнять заданные функции в заранее неопределенных динамически изменяющихся условиях при целенаправленном воздействии противника на подсистему или ее отдельные элементы [25], поддерживать непрерывное выполнение своих основных функций, временно или постоянно отказываясь от выполнения менее важных функций, изменять свою структуру и поведение, находить и выполнять новые функции, необходимые для успешного противостояния неблагоприятным воздействиям, приспосабливаясь к условиям своего функционирования [49].

При рассмотрении конструкций как объектов машиностроения, независимо от их отраслевой принадлежности, живучесть связывают с возникновением и ростом усталостных трещин при циклическом нагружении и количественно оценивают как способность сопротивляться развитию трещин (в терминах трещиностойкости), или как число циклов нагружения до перехода усталостной трещины в хрупкую (в терминах ресурса/долговечности) [9, 39, 102-104, 112, 116, 131].

Что касается живучести стержневых конструкций, подавляющая часть теоретических, экспериментальных и численных исследований выполнена применительно к строительным конструкциям и инженерным сооружениям [19, 23, 35, 81, 96, 168]. Но следует отметить, что в этой предметной области значительная часть исследований направлена на анализ свойств и поведения повреждаемых конструкций на разных стадиях развития аварии без использования понятия и терминологии живучести [6, 90, 123, 145, 196, 199, 203, 214, 222, 223, 234, 239, 240]. В литературе и нормативных документах [162] общепринят термин «прогрессирующее (лавинообразное) обрушение», под которым понимается «последовательное (цепное) разрушение не-

сущих строительных конструкций, приводящее к обрушению всего сооружения или его частей вследствие локального разрушения».

Однако оперирование понятием живучести и смежными понятиями дает возможность более адекватно описывать свойства повреждаемых конструкций и управлять ими. Рассмотрим далее варианты физико-технического проявления, определения понятия и сути свойства живучести.

Под живучестью (в англоязычной литературе – *robustness*, реже *survivability*) силовых, преимущественно стержневых, конструкций понимают:

способность поврежденной системы адаптироваться к новым изменившимся и, как правило, непредвиденным ситуациям, противостоять вредным воздействиям, выполняя при этом полностью или частично свою целевую функцию, за счет соответствующего изменения структуры и поведения системы; стойкость в запроектной ситуации; свойство самосохранения при повреждениях в виде полного отказа отдельных элементов конструкции [98];

способность оказывать сопротивление внешним воздействиям, когда несколько элементов системы выйдут из строя; свойство механической системы, определяющее ее способность сохранять по крайней мере ограниченную несущую способность при повреждении или разрушении отдельных элементов системы или при накоплении необратимых деформаций, приводящих к изменению ее геометрии [166];

способность системы выполнять предписанные ей функции после повреждения или разрушения ее отдельных элементов (под повреждением понимается отказ отдельных элементов, возникновение трещин, коррозии и т.д.) [109];

сохранение (полное или частичное) функциональных свойств сооружения после его повреждения [96];

свойство конструкции сопротивляться особым воздействиям без возникновения повреждений, непропорциональных вызвавшей их причине [6];

способность частично выполнять свои функции при разрушении отдельных элементов [168];

характеристика неразрушимости несущей системы в течение расчетного эвакуационного промежутка времени при внезапных запроектных воздействиях [2];

свойство конструкции выполнять заданные функции в полном или ограниченном объеме при отказе одного или нескольких элементов конструктивной системы [3];

способность системы нести некоторую нагрузку после хрупкого разрушения одного или более критических компонентов [211];

свойство конструктивной системы выполнять заданные функции в течение эвакуационного промежутка времени в полном или ограниченном объеме при отказе одного или нескольких элементов, характеризующееся количеством локальных разрушений конструктивной системы [81].

Смысл всех приведенных определений вполне согласуется с формулировкой термина «живучесть», содержащейся в ГОСТ 27.002-89 [51]: «свойство объекта, состоящее в его способности противостоять развитию критических отказов из дефектов и повреждений при установленной системе технического обслуживания и ремонта, или свойство объекта сохранять ограниченную работоспособность при воздействиях, не предусмотренных условиями эксплуатации, или свойство объекта сохранять ограниченную работоспособность при наличии дефектов и повреждений определенного вида, а также при отказе некоторых компонентов». Несмотря на то, что ГОСТ 27.002-89 в настоящее время не действует, а в ГОСТ 27.002-2015 [50] определение термина «живучесть» отсутствует, употребление этого термина узаконено ГОСТ 15.016-2016 [49] именно в формулировке ГОСТ 27.002-89. Таким образом, понятие живучести расширяет понятие надежности, т.к. кроме естественного старения элементов системы учитывает возможность их выхода из строя в результате вредных воздействий некоторых активных агентов внешней среды [95].

Из приведенных выше формулировок можно умозаключить, что квинтэссенцией понятия живучести является степень чувствительности объекта к локальным повреждениям и неблагоприятным внешним воздействиям при сохранении как минимум частичной работоспособности: чем менее объект чувствителен, тем более он живуч.

В чем проявляется живучесть на физико-техническом уровне рассмотрения? Как понять, что конструкция является живучей? Что нужно сделать, чтобы придать конструкции свойство живучести? Чтобы расшифровать приведенные выше определения, рассмотрим далее признаки живучих конструкций с точки зрения различных исследователей.

Живучесть означает нечувствительность конструкции к локальным повреждениям [238].

Живучая конструкция обладает меньшей чувствительностью к непредвиденным (запроектным) нагрузкам и дефектам, которые не включены в нормы и расчетные требования [168].

В живучей конструкции не возникает непропорциональных последующих повреждений из-за первоначальных повреждений [238].

Живучесть, обеспечиваемая системной избыточностью, проявляется временной задержкой перед коллапсом системы [229].

Системы, обладающие большой живучестью, разрушаются постепенно, сохраняя при этом ограниченную работоспособность. Системы с малой живучестью разрушаются резко и катастрофически, что сопровождается значительными вторичными и каскадными разрушениями, которые являются несоразмерными (непропорциональными) инициирующим воздействиям [109, 166]. Живучесть проявляется в том, что система сохраняет не все функции, а лишь основные из них, да и то с возможным понижением качества их выполнения. Живучая конструкция не должна быть подвержена эффекту «домино» - цепочки отказов каскадного типа, вызывающих прогрессивное разрушение системы [19].

Система живуча, если может пережить произвольное повреждение. Если конструкция уязвима хотя бы по одной моде уязвимости, она не является живучей [192].

Зачастую живучесть закладывается в проектируемые системы на подсознательном (интуитивном) уровне. Желаемое свойство живучести подменяется требованием недопущения прогрессирующего (лавинообразного, каскадного, цепного, диспропорционального) разрушения. Конкретные конструктивно-технические решения, обеспечивающие живучесть, рассматриваются в [7, 90, 98, 145].

Рассмотрим далее наиболее широко распространенные количественные показатели живучести.

В наиболее общем виде системная живучесть как характеристика нечувствительности к неблагоприятным факторам выражается как [198]

$$R_s = \frac{1}{1 + s_X},\tag{1.1}$$

где  $s_X = \frac{\delta G_s}{\delta X_s}$  – чувствительность системной характеристики  $G_s$  по отношению к величине возмущающего события  $X_s$ . Некоторая конкретизация этого выражения основана на базе показателей риска [198]:

$$I_{ROB} = \frac{1}{1 + \frac{R_{ind}}{R_{dir}}} = \frac{R_{dir}}{R_{dir} + R_{ind}},$$
(1.2)

где  $R_{dir}$  – величина прямого (вызванного первоначальным повреждением) риска;  $R_{ind}$  – величина непрямого (вызванного дальнейшей эскалацией разрушения вследствие первоначального повреждения) риска.

В соответствии с [98] индекс живучести

$$I_{RC} = \frac{R_{\max} - R_g}{R_{\max}},\tag{1.3}$$

где  $R_{max}$  – максимально возможное повреждение (связность), при котором еще сохраняется конструкционная целостность;  $R_g$  – полученное повреждение.

Количественный показатель живучести предложено определять на основе соотношения между числом неповрежденных и общим количеством конструктивных элементов [19]

$$K_{s} = \frac{\sum_{i=1}^{m} k_{i} (N_{i} - n_{i})}{\sum_{i=1}^{m} N_{i}},$$
(1.4)

где m – число групп элементов;  $k_i$  – весовой коэффициент для *i*-й группы элементов;  $N_i$  – общее количество конструктивных элементов *i*-той группы;  $n_i$  – количество поврежденных элементов в *i*-й группе.

Детерминированные показатели общего вида [237] учитывающие интенсивность развития повреждений после первоначального повреждения

$$R_{di} = 1 - \frac{P_d}{P_{\rm lim}} \tag{1.5}$$

и энергетические характеристики разрушения

$$R_e = \max_j \frac{E_j}{E_k},\tag{1.6}$$

где  $P_d$  – максимальный дополнительный прирост повреждения;  $P_{lim}$  – приемлемый прирост повреждения;  $E_k$  – энергия, необходимая для повреждения *k*-го конструктивного элемента;  $E_j$  – энергия, высвобождаемая при повреждении *j*-го конструктивного элемента и направленная на повреждение *k*-го конструктивного элемента.

Ряд показателей живучести формулируется в форме коэффициентов запаса. К ним относятся коэффициенты [211]

$$R_u = \frac{LF_u}{LF_1}; \qquad \qquad R_f = \frac{LF_f}{LF_1}; \qquad \qquad R_d = \frac{LF_d}{LF_1} , \qquad (1.7)$$

где  $LF_1$  – нагрузка, при которой разрушается первый конструктивный элемент;  $LF_u$  – нагрузка, разрушающая неповрежденную конструкцию;  $LF_f$  – нагрузка, при которой нарушаются функциональные характеристика конструкции;  $LF_d$  – нагрузка, разрушающая поврежденную конструкцию.

В терминах свойств конструкционного материала аналогичный показатель – индекс прочностной избыточности [210] – определяется как

$$r_s = \frac{s_u}{s_y},\tag{1.8}$$

где *s*<sub>*u*</sub> – предел прочности; *s*<sub>*y*</sub> – предел текучести.

Детерминированные индексы живучести в соответствии с [226] определяются как

$$DSR = \frac{v_r}{v_d}; \qquad RIF = \frac{v_r}{v_u}, \qquad (1.9)$$

где  $v_r$  – предельная несущая способность поврежденной конструкции;  $v_d$  – величина проектной нагрузки;  $v_u$  – предельная несущая способность неповрежденной конструкции.

В терминах жесткости (перемещений) конструкции определяют индексы живучести (1.10) [198] и (1.11) [195]:

$$R_{sd} = \min\left(\frac{\det K_i}{\det K_0}\right),\tag{1.10}$$

$$\rho_s = \frac{\|s_0\|}{\|s_d\|},\tag{1.11}$$

где  $\det K_i$ ,  $\det K_0$  – детерминанты матриц жесткости поврежденной и неповрежденной конструкции;  $||s_0||$ ,  $||s_d||$  – нормы вектора перемещений неповрежденной и поврежденной конструкции.

К детерминированным показателям относится также параметр живучести λ<sub>cr</sub> – минимальная нагрузка конструктивной системы, при которой возникают локальные повреждения или прогрессирующее разрушение в случае внезапного удаления одного конструктивного элемента [35, 170]. В качестве характеристики живучести рассматривается также величина силового нагружения, при которой конструкция переходит в изменяемую систему [3].

Рассмотрим далее некоторые вероятностные показатели.

Индекс живучести, основанный на надежности в связи со статическим рассеянием несущей способности и нагрузки [138]

$$I = \frac{\beta_{\text{int}}}{\beta_{\text{int}} - \beta_d} , \qquad (1.12)$$

где  $\beta_{int}$ ,  $\beta_d$  – индексы надежности неповрежденной и поврежденной конструкции;

$$\beta = \frac{\overline{R} - \overline{F}}{\sqrt{S_R^2 + S_F^2}} , \qquad (1.13)$$

 $\overline{R}$ ,  $\overline{F}$  – средние значения (матожидания) несущей способности и нагрузки;

 $S_R^2$ ,  $S_F^2$  – дисперсии несущей способности и нагрузки.

В случае вероятностной трактовки системной избыточности индекс избыточности [229]

$$RI = \frac{P_f(dmg) - P_f(sys)}{P_f(sys)} , \qquad (1.14)$$

где  $P_{f(dmg)}$  – вероятность отказа системы;  $P_{f(sys)}$  – вероятность повреждения (отказа первого конструкционного элемента).

Ряд вероятностных показателей живучести основан на вероятностях реализации различных возможных сценариев развития повреждений.

Функция живучести в соответствии с [166]

$$G(t) = \frac{\sum_{k=1}^{K_{ss}} g_k(t) \cdot P_k(t)}{\sum_{k=1}^{K} P_k(t)}, \qquad (1.15)$$

где  $K_{ss}$  – количество возможных сценариев;  $P_k(t)$  – вероятность реализации *k*-го сценария;  $g_k(t) = 1 - \mu(t)$  – мера живучести;  $\mu(t) = 1 - \frac{n^e(t+0)}{n^e(t-0)}$  – плавность изменения несущей способно-

сти; *n<sup>e</sup>* – потенциальная энергия упругой деформации.

Индекс живучести, основанный на соотношении рисков прямых и косвенных ущербов [109]

$$G_{np, \kappa oc} = \frac{\sum_{m_d}^{m_d} R_{np}}{\sum_{m_d}^{m_d} R_{np} \cdot \sum_{\kappa}^{n_d} R_{\kappa oc}} , \qquad (1.16)$$

где  $m_d$  – количество сценариев, в которых имеют место прямые ущербы и риски, обусловленные локальными повреждениями системы (общее количество сценариев);  $n_d$  – количество сценариев, в которых имеют место прямые ущербы и риски, связанные с отказами системы в целом. Индекс характеризует живучесть как способность снижать риск непропорционального (катастрофического) разрушения в случае локального повреждения.

Таким образом, живучесть проявляется как сложное, интегральное качество системы и количественно оценивается показателями устойчивости, прочности, надежности, адаптивности, отказоустойчивости, помехоустойчивости и т.д. Однако эти показатели не имеют непосред-

ственной связи с особенностями конструктивных форм и в большинстве случаев не позволяют сформулировать конкретные рекомендации по повышению или обеспечению живучести.

Следует также отметить отсутствие регламентов практического применения выражений (1.1)-(1.16): нет ясности в выборе принимаемых в учет неблагоприятных факторов и событий, или их последовательности (сценариев), вызываемых ими повреждений и разрушений.

## 1.3 Подходы к определению сценариев накопления повреждений и разрушения в исследованиях живучести

Как показано в разделе 1.1, фактически произошедшие разрушения, аварии и катастрофы могут быть описаны в виде сценариев накопления повреждений различной степени тяжести. В свою очередь, ряд показателей живучести, описанных в разделе 1.2 (выражения (1.15), (1.16)), определяются с учетом реализации некоторого сценария накопления повреждений. В связи с этим рассмотрим встречающиеся в научно-технической литературе возможные варианты подходов к определению (обоснованию) сценариев накопления повреждений.

Установлены три принципиально отличающиеся подхода к определению сценариев, отличающиеся тем, что каждый последующий шаг разрушения обусловлен:

– состоянием поврежденности (накопленным уровнем повреждений), определенным предыдущими шагами (преимущественно внутренним состоянием системы) – вариант I;

 – гипотетической последовательностью событий, определяемой по результатам анализа произошедших или предполагаемых возможными аварий и разрушений (преимущественно внешними воздействиями на систему) – вариант II;

– предварительными соображениями о вкладе различных функциональных групп структурных элементов конструкции в формирование ее запаса живучести – вариант III.

В рамках варианта I подхода выполняется численное или экспериментальное исследование физико-технических процессов развития и накопления повреждений, то есть анализируется некоторый индивидуальный сценарий, реализующийся при совершенно однозначной комбинации начальных и граничных условий для рассматриваемой конструкции. Наиболее формализованным примером такого подхода является нормируемый в области строительных конструкций алгоритм расчета на устойчивость против прогрессирующего обрушения [162]: в расчетной схеме выключается (удаляется) один из вертикальных или горизонтальных несущих элементов; мгновенное удаление выключаемого элемента моделируется усилиями, определенными в этом элементе при расчете по первичной схеме, прикладываемыми во вторичной схеме с обратным знаком; выполняется расчет напряженно-деформированного состояния (НДС) и проверка условий прочности. Их нарушение в одном из структурных элементов свидетельствует о возникновении прогрессирующего разрушения и предполагает повторный цикл анализа с удалением установленного структурного элемента. При этом предпочтительны к исключению из расчетной схемы несущие элементы, имеющие наибольшую грузовую площадь, расположенные у края перекрытия, расположенные в углу здания, колонны либо участки пересекающихся или примыкающих под углом несущих стен. Аналогичные по своей сути алгоритмы, но без какойлибо регламентации предполагаемых разрушаемыми структурных элементов, реализованы для анализа сценариев повреждения и разрушения сосудов и резервуаров [220, 225, 233], корпуса атомного реактора [61], несущих конструкций линий электропередач [213].

Реализация варианта II подхода представлена исследованиями, направленными на изучение реакции конструкции на одно или несколько последовательных повреждающих воздействий. В строительной отрасли эти воздействия определяются и согласовываются на стадии проектирования технического объекта [161], в других случаях вытекают из целей и задач исследования. Такой подход реализован при анализе опасностей сценариев повреждения несущих конструкций стадионов [17], подкраново-подстропильных ферм [72], силовых конструкций космических ядерных энергетических установок [8], корпуса корабля [142], грунтовой перемычки водосброса [88].

Вариант III подхода реализуется в исследованиях живучести, определяемой только структурой системы (схемной живучести по [124]). Как отмечается в [167], основной недостаток указанного подхода заключается в субъективности выбора группы элементов, изымаемых из конструкции. Однако, этот подход дает возможность абстрагироваться от особенностей физико-технических процессов повреждения и разрушения и сосредоточиться на анализе свойств конструкций и вклада отдельных структурных элементов или их групп в формирование свойства живучести в зависимости от уровня поврежденности. Преимущество такого подхода в том, что анализу подвергаются конструкции с повреждениями, для которых не найдены (не исследовались) причины и условия их возникновения. В результате есть возможность исследовать любые гипотетически возможные и неочевидные состояния поврежденности.

Таким образом, вариант I подхода к определению сценариев наиболее индивидуализирован. Он позволяет исследовать поведение повреждаемой конструкции при строго детерминированном наборе параметров, характеризующих конкретный экземпляр технического объекта и условия его работы. Вариант II дает возможность сосредоточить внимание на анализе привносимых извне факторов и событий. Вариант III является наиболее общим и направлен на выявление наиболее уязвимых структурных элементов и групп элементов, включаемых в общую силовую схему конструкции, а также на проведение качественного сравнительного анализа вариантов конструктивных схем.

#### 1.4 Живучесть стержневых конструкций с позиций системного подхода

Как показано в подразделе 1.1, аварии и разрушения стержневых конструкций технических объектов следует рассматривать как сложные многофакторные процессы и явления, формирующиеся в результате как внутрисистемного взаимодействия элементов конструкций, так и их взаимодействия с внешним системным окружением. Оценка живучести в связи с уровнями поврежденности и нагруженности [33<sup>2</sup>] представляет собой сложную многофакторную научно-техническую проблему. При изучении сложных многофакторных явлений и процессов эффективным является системный подход, направленный на рассмотрение объекта как системы (целостного комплекса взаимосвязанных элементов, совокупности взаимодействующих объектов, совокупности сущностей и отношений). В основе системного подхода лежит научный метод декомпозиции, позволяющий расчленить изучаемую систему на части, заменить решение сложной задачи решением серии меньших задач, взаимосвязанных, но более простых.

Принадлежность технического объекта к классу силовых конструкций стержневого типа (стержневых систем) определяется наличием системообразующих факторов (таблица 1.1), формирующих комплекс свойств объекта. Свойства стержневой системы являются результатом системного взаимодействия свойств стержневых элементов, их соединений и пространственного расположения стержней относительно друг друга (конструктивной схемы, структуры). Что касается свойств опор, целесообразно их вынести за пределы стержневой системы и учитывать с позиций влияния системного окружения на формирование нагрузок и воздействий на стержневую систему.

Таким образом, с системных позиций в целях исследования механики стержневых конструкций они традиционно представляются в виде суммы свойств стержневых элементов, соединений и конструктивной схемы (рисунок 1.3).



Рисунок 1.3 – Декомпозиция свойств стержневой конструкции с позиций механики деформирования

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup> В публикации [33] результаты, полученные соискателем лично, составляют 100 % от объема всей публикации.

Это подтверждается следующими рассуждениями. Изменение свойств элемента (например, сечения и материала стержня), соединения (замена шарнирного соединения на жесткое), конструктивной схемы немедленного выражается в изменении свойств всей системы. Невозможна ситуация, когда НДС стержневой конструкции будет неизменным при изменении свойств элементов, соединений и конструктивной схемы.

Возникают вопросы: что целесообразно включать в состав исследуемой системы при анализе свойства живучести? Идентичен ли состав системы для анализа живучести составу системы для анализа деформирования (рисунок 1.3)?

Трактуя живучесть как степень чувствительности работоспособности объекта к локальным повреждениям (подраздел 1.2), будем рассуждать следующим образом. Локальное повреждение одного стержневого элемента (например, развитие трещины усталости, коррозия, локальная потеря устойчивости) не приведет к сколько-нибудь заметному снижению работоспособности стержневой конструкции. Здесь принципиально важным оказывается способность стержня передавать силовой поток, несмотря на наличие локальных повреждений. Таким образом, влиянием локальных повреждений стержня на работоспособность конструкции можно пренебречь.

Потеря несущей способности стержня вследствие разрушения или потери устойчивости приведет к немедленному изменению состояния стержневой конструкции вследствие фактического изменения конструктивной схемы и перераспределения силовых факторов между оставшимися в системе стержневыми элементами. Чувствительность работоспособности к исключению стержня из системы предположительно велика. Однако, по-видимому, следует трактовать потерю несущей способности одного стержня не как локальное повреждение стержня (его в деформируемой системе фактически больше нет), а как повреждение конструктивной схемы (структуры).

Конструктивные варианты исполнения стержневых элементов и узлов их сочленения характеризуются большим разнообразием. При Этом разнообразие И сложность конструктивного исполнения узлов сочленения превосходят таковые для стержневых элементов [29<sup>3</sup>]. Реальная жесткость узла сочленения всегда выше нуля (соответствующего модели шарнирного узла в ферменных конструкциях), но ниже соответствующей модели жесткого соединения в рамных конструкциях (бесконечные значения). Любые локальные повреждения узла сочленения выражаются в изменении его жесткости, что приводит к перераспределению силовых факторов между входящими в узел сочленения стержневыми элементами. Таким образом, чувствительность работоспособности стержневой конструкции к локальному повреждению узла сочленения является значительным фактором.

27

<sup>&</sup>lt;sup>3</sup> В публикации [29] результаты, полученные соискателем лично, составляют 100 % от объема всей публикации.

Из вышесказанного вытекает целесообразность рассматривать живучесть стержневой конструкции как интегральное свойство, формируемое живучестью конструктивной схемы и узлов сочленения (рисунок 1.4) [180<sup>4</sup>].



Рисунок 1.4 – Декомпозиция свойства конструкционной живучести

Следует отметить, что исследование живучести узла сочленения требует разработки их трехмерных моделей с возможностью параметризации и численного анализа их НДС [33<sup>2</sup>, 68<sup>5</sup>].

Что касается декомпозиции понятия живучести, она должна быть положена в основу формализации цепочки моделей, последней из которых является программное обеспечение анализа той или иной характеристики живучести (рисунок 1.5).



Рисунок 1.5 – Иерархия моделей

В этой цепочке первое звено – функциональная модель – обеспечивает формализацию вербальной декомпозиции конструкции и понятия живучести и определяет функцию системы (в данном случае системы анализа конструкционной живучести), отражающую ее предназначение. В системе международной и отечественной стандартизации информационных технологий методология функционального моделирования определяется стандартами IDEF0 [216, 135]. Модель IDEF0 структурной декомпозиции конструкционной живучести может быть представлена деревом узлов (рисунок 1.6).

<sup>2</sup> В публикации [33] результаты, полученные соискателем лично, составляют 100 % от объема всей публикации.

<sup>&</sup>lt;sup>4</sup> В публикации [180] результаты, полученные соискателем лично, составляют 100 % от объема всей публикации.

<sup>&</sup>lt;sup>5</sup> В публикации [68] личный вклад соискателя заключается в построении моделей структур стержневых систем и составляет 60 % от объема всей публикации.



Рисунок 1.6 – Дерево узлов функциональной модели конструкционной живучести

На основании дерева узлов разработана функциональная модель анализа живучести стержневых конструкций (рисунок 1.7), отражающая взаимосвязь отдельных задач и информационных элементов. Эта модель отражает все системные аспекты анализа живучести повреждаемых стержневых конструкций.



Рисунок 1.7 – Функциональная модель анализа конструкционной живучести

Рассмотрим далее содержание информационных элементов, входящих в функциональную модель. Очевидно наличие плохо формализуемых объектов, требующих участия эксперта-исследователя, и объектов формализованных, реализуемых и реализованных в виде алгоритмов и программного обеспечения.

К плохо формализуемым относятся в первую очередь обоснование сценариев накопления повреждений и разрушения соединений элементов и структуры системы. Хорошо формализованы и алгоритмизируемы методы и вычислительные технологии анализа НДС, как в линейной постановке, так и с учетом возможных нелинейных эффектов при возникновении повреждений.

С учетом этого в рамках системной декомпозиции живучести стержневой конструкции предполагается разработка процедурных и вычислительных моделей анализа живучести, предполагающая их «сборку» («конструирование») из отдельных логических блоков, каждый из которых реализует либо неформальную человеко-машинную процедуру, либо хорошо отработанный алгоритм (программу). Последние, как правило, не являются специфическими для задач живучести стержневых конструкций, но являются важнейшими компонентами при создании комплексных вычислительных моделей живучести.

### 1.5 Выводы по разделу 1

Из выполненного литературного обзора современного состояния нарушений работоспособности стержневых конструкций, понятий и показателей живучести, подходов к определению сценариев накопления повреждений и разрушения вытекают следующие выводы.

1. Эксплуатация стержневых конструкций в составе технических объектов вне зависимости от их отраслевой принадлежности сопровождается возникновением большого количества повреждений и локальных разрушений, причем заранее неизвестно влияние уровня поврежденности на степень снижения работоспособности. Общетехнические подходы к оценке свойств стержневых конструкций в связи уровнем их поврежденности не разработаны;

2. Известные показатели и методы анализа живучести являются универсальными и характеризуются высоким уровнем абстрагирования от конструктивных форм технических объектов. Наиболее развиты подходы к практическому анализу живучести стержневых конструкций в строительной отрасли, но они в большей степени направлены на учет особенностей их работы в составе характерных технических решений зданий и сооружений. Неизвестны внеотраслевые критерии и показатели стержневых конструкций, учитывающие их системные особенности как специфического класса силовых конструкций технических объектов. Таким образом, проблемная ситуация заключается в том, что существующее научное знание оказывается недостаточным, чтобы с единых методических позиций прогнозировать свойства и поведение стержневых конструкций при характерных для них повреждениях и локальных разрушениях. Необходимо расширение научных знаний в области показателей, критериев, технологий анализа живучести стержневых конструкций вне зависимости от отраслевой принадлежности технических объектов. Это предполагает

 исследование НДС стержневых конструкций при повреждении их структурных элементов для анализа их живучести;

– формулировка и практическая апробация количественных показателей, критериев, методик оценки структурной живучести стержневых конструкций в связи с их функциональным назначением;

 – разработка и практическая апробация показателей и методики анализа живучести структурно-сложных узлов сочленения стержневых элементов в связи с расчетной и экспериментальной реализацией возможных сценариев их разрушения. 2 Анализ напряженно-деформированного состояния повреждаемых стержневых конструкций для оценки их живучести

### 2.1 Базовая вычислительная модель статического упругого анализа

Все оценки живучести основаны на информации о НДС исследуемого объекта. В свою очередь, любой анализ НДС включает в себя в качестве основной части определение статического упругого НДС. В связи с этим алгоритм статического упругого анализа является важнейшим универсальным компонентом рассматриваемых далее вычислительных моделей. Рассмотрим в наиболее общей (трехмерной) постановке основополагающие соотношения механики деформируемого твердого тела, лежащие в основе соответствующего численного (конечноэлементного) алгоритма [14].

Дискретизация системы при статической постановке задачи базируется на интегральной формулировке вариационного типа исследуемого процесса деформирования. В качестве свойства (признака), позволяющего отличить действительное состояние деформируемого твёрдого тела от других возможных состояний, обычно рассматривают минимум потенциальной энергии этого тела:

$$\Phi = V - R \rightarrow \min, \tag{2.1}$$

где *V* – потенциальная энергия деформации (квадратичный функционал от компонент деформаций); *R* – работа внешних сил (линейный функционал от компонент перемещений).

Наибольшее распространение получила запись минимума функционала (2.1) в форме функционала Лагранжа (варьируются перемещения). Если точки тела получат «возможные смещения», вариация функционала в матричной форме имеет вид

$$\delta \Phi_{\varepsilon} = \underset{V}{\coprod} \{\delta \varepsilon\}^{T} \{\sigma\} dV - \underset{V}{\coprod} \{\delta u\}^{T} \{F^{*}\} dV - \underset{S_{\sigma}}{\amalg} \{\delta u\}^{T} \{p^{*}\} dS = 0,$$
(2.2)

где  $\delta V = \iiint_V \{\delta \varepsilon\}^T \{\sigma\} dV$ ;  $\delta R = \oiint_V \{\delta u\}^T \{F^*\} dV + \oiint_{S_\sigma} \{\delta u\}^T \{p^*\} dS$ ;  $\{\delta \varepsilon\}$  – вектор вариации де-

формаций; { $\sigma$ } – вектор напряжений; { $\delta u$ } – вектор вариации перемещений (на поверхности  $S_u$ { $\delta u$ } = 0);{ $F^*$ }, { $p^*$ } – векторы заданных значений объемной и поверхностной нагрузок; величина { $\delta \varepsilon$ }<sup>T</sup>{ $\sigma$ } =  $\delta \mathcal{P}_1$  – работа внутренних сил на возможных перемещениях, или вариация удельной энергии деформации

Идея дискретизации сложной конструкции для расчета ее НДС заключается в расчленении ее на простейшие части (конечные элементы), НДС которых сравнительно легко описывается, и в объединении их вновь в единую конструкцию с выполнением условия равновесия и неразрывности поля перемещений. Существенным здесь является представление функционала (2.1) системы в виде суммы соответствующих функционалов для каждого элемента:

$$\Phi = V - R = \sum_{n=1}^{N} \Phi_n = \sum_{n=1}^{N} (V_n - R_n), \qquad (2.3)$$

Таким образом, функционал заменен дискретным аналогом, записанным для системы взаимосвязанных узлов (конечно-элементной модели). Минимизация этого функционала (реализация вариационного принципа минимума потенциальной энергии) предопределяет способ вычисления матриц жесткости элементов, системы линейных алгебраических уравнений и вектора узловых сил таким образом, чтобы получить минимум потенциальной энергии.

С учетом последнего выражения вариационное уравнение Лагранжа (2.2) для всего тела может быть записано в виде

$$\sum_{n=1}^{N} \left( \underset{V_n}{\boxplus} \{\delta \varepsilon_n\}^T \{\sigma_n\} dV - \underset{V_n}{\boxplus} \{\delta u_n\}^T \{F^*\} dV - \underset{S_n \in S_{\sigma}}{\Downarrow} \{\delta u_n\}^T \{p^*\} dS \right) = 0,$$
(2.4)

где N – число конечных элементов в системе;  $V_n$  – объем *n*-го конечного элемента; є,  $\sigma$ , *u* с индексом *n* относятся к *n*-му конечному элементу; выражение  $S_n \in S_{\sigma}$  означает, что суммирование распространяется на части поверхности элементов, примыкающих к поверхности  $S_{\sigma}$ , на которой заданы распределенные внешние усилия.

С учетом уравнений упругости (соотношений между перемещениями, деформациями и напряжениями) уравнение (2.4) преобразуется в уравнение

$$\sum_{n=1}^{N} \left( \underset{V_{n}}{\iiint} ([B] \{ \delta u \})^{T} [A] [B] \{ u \} dV - \underset{V_{n}}{\iiint} ([B] \{ \delta u \})^{T} [A] dV - \underset{V_{n}}{\iiint} ([B] \{ \delta u \})^{T} [A] dV - \underset{V_{n} \in S_{\sigma}}{\iiint} ([B] \{ \delta u \})^{T} [A] dV - \underset{S_{n} \in S_{\sigma}}{\iiint} ([B] \{ \delta u \})^{T} [A] dV - \underset{S_{n} \in S_{\sigma}}{\iiint} ([B] \{ \delta u \})^{T} [A] dV - \underset{S_{n} \in S_{\sigma}}{\iiint} ([B] \{ \delta u \})^{T} [A] dV - \underset{S_{n} \in S_{\sigma}}{\iiint} ([B] \{ \delta u \})^{T} [A] dV - \underset{S_{n} \in S_{\sigma}}{\iiint} ([B] \{ \delta u \})^{T} [A] dV - \underset{S_{n} \in S_{\sigma}}{\iiint} ([B] \{ \delta u \})^{T} [A] dV - \underset{S_{n} \in S_{\sigma}}{\iiint} ([B] \{ \delta u \})^{T} [A] dV - \underset{S_{n} \in S_{\sigma}}{\iiint} ([B] \{ \delta u \})^{T} [A] dV - \underset{S_{n} \in S_{\sigma}}{\iiint} ([B] \{ \delta u \})^{T} [A] dV - \underset{S_{n} \in S_{\sigma}}{\iiint} ([B] \{ \delta u \})^{T} [A] dV - \underset{S_{n} \in S_{\sigma}}{\iiint} ([B] \{ \delta u \})^{T} [A] dV - \underset{S_{n} \in S_{\sigma}}{\iiint} ([B] \{ \delta u \})^{T} [A] dV - \underset{S_{n} \in S_{\sigma}}{\iiint} ([B] \{ \delta u \})^{T} [A] dV - \underset{S_{n} \in S_{\sigma}}{\iiint} ([B] \{ \delta u \})^{T} [A] dV - \underset{S_{n} \in S_{\sigma}}{\iiint} ([B] \{ \delta u \})^{T} [A] dV - \underset{S_{n} \in S_{\sigma}}{\iiint} ([B] \{ \delta u \})^{T} [A] dV - \underset{S_{n} \in S_{\sigma}}{\iiint} ([B] \{ \delta u \})^{T} [A] dV - \underset{S_{n} \in S_{\sigma}}{\iiint} ([B] \{ \delta u \})^{T} [A] dV - \underset{S_{n} \in S_{\sigma}}{\iiint} ([B] \{ \delta u \})^{T} [A] dV - \underset{S_{n} \in S_{\sigma}}{\iiint} ([B] \{ \delta u \})^{T} [A] dV - \underset{S_{n} \in S_{\sigma}}{\iiint} ([B] \{ \delta u \})^{T} [A] dV - \underset{S_{n} \in S_{\sigma}}{\iiint} ([B] \{ \delta u \})^{T} [A] dV - \underset{S_{n} \in S_{\sigma}}{\iiint} ([B] \{ \delta u \})^{T} [A] dV - \underset{S_{n} \in S_{\sigma}}{\iiint} ([B] \{ \delta u \})^{T} [A] dV - \underset{S_{n} \in S_{\sigma}}{\iiint} ([B] \{ \delta u \})^{T} [A] dV - \underset{S_{n} \in S_{\sigma}}{\iiint} ([B] \{ \delta u \})^{T} [A] dV - \underset{S_{n} \in S_{\sigma}}{\iiint} ([B] \{ \delta u \})^{T} [A] dV - \underset{S_{n} \in S_{\sigma}}{\iiint} ([B] \{ \delta u \})^{T} [A] dV - \underset{S_{n} \in S_{\sigma}}{\iiint} ([B] \{ \delta u \})^{T} [A] dV - \underset{S_{n} \in S_{\sigma}}{\iiint} ([B] \{ \delta u \})^{T} [A] dV - \underset{S_{n} \in S_{\sigma}}{\iiint} ([B] \{ \delta u \})^{T} [A] dV - \underset{S_{n} \in S_{\sigma}}{\iiint} ([B] \{ \delta u \})^{T} [A] dV - \underset{S_{n} \in S_{\sigma}}{\iiint} ([B] \{ \delta u \})^{T} [A] dV - \underset{S_{n} \in S_{\sigma}}{\iiint} ([B] \{ \delta u \})^{T} [A] dV - \underset{S_{n} \in S_{\sigma}}{\iiint} ([B] \{ \delta u \})^{T} [A] dV - \underset{S_{n} \in S_{\sigma}}{\iiint} ([B] \{ \delta u \})^{T} [A] dV - \underset{S_{n} \in S_{\sigma}}{\iiint} ([B] \{ \delta u \})^{T} [A] dV - \underset{S_{n} \in S_{\sigma}}{\iiint} ([B] \{ \delta u \})^{T} [A] dV - \underset{S_{n} \in S_{\sigma}}{\iiint} ([B] \{ \delta u \})^{T} [A] dV - \underset{S_{n} \in S_{\sigma}}{\iiint} ([$$

где [B] – матрица деформаций;  $\{u\}, \{\delta u\}$  – векторы перемещений узлов конечно-элементной системы и их вариаций; [A] – матрица коэффициентов жесткости (матрица жесткости материала);  $\varphi_l(x)$  – система аппроксимирующих функций конечных элементов (функции формы, координатные функции), определяющие перемещения любой точки конечного элемента через перемещения узлов элементов, координаты узлов и рассматриваемой точки.

Выполняя операцию транспонирования над произведением матрицы и вектора и вынося из-под знака интеграла смещения узлов и их вариации, находим уравнения узловых смещений

$$\sum_{n=1}^{N} \{\delta u\}^{T} ([K]\{u\} - \{F\}) = 0, \qquad (2.6)$$

где  $\{F\}$  – вектор обобщенных узловых усилий, статически эквивалентных действию внешних нагрузок.

Избавляясь от вариаций, систему линейных алгебраических уравнений относительно неизвестных узловых смещений для всей конечно-элементной модели на основании (2.6) можно записать в виде

$$[K]{u} = {F}, \qquad (2.7)$$

где [*K*] – глобальная матрица жесткости конечно-элементной модели. Каждая строка матричного уравнения (2.7) получается как множитель при вариации смещений соответствующего узла. Узел может входить сразу в несколько элементов и для *i*-й строки будем иметь

$$\sum_{n \in i} ([K]\{u\} - \{F\}) = 0.$$
(2.8)

Запись означает, что суммирование распространяется на элементы, содержащие узел *i*, причем из всего уравнения для *n*-го элемента суммирование относится только к строке, соответствующей вариации *i*-го узла.

Таким образом, дискретизация конечными элементами системы с распределенными параметрами позволяет описать последнюю глобальной матрицей жесткости [K], определяющей в соответствии с (2.7) смещения узлов  $\{u\}$  при действии внешних сил  $\{F\}$ .

Моделирование деформирования системы с распределенными параметрами, дискретизированной как система конечных элементов, предполагает решение следующих основных задач.

1. Аппроксимация поля перемещений внутри конечного элемента по известным его узловым перемещениям с использованием системы функций  $\varphi_l(x)$ , получаемых на базе предположений о характере поля перемещений в элементе.

2. Численное построение матрицы жесткости конечного элемента, заключающееся в вычислении квадратной матрицы:

$$\begin{bmatrix} k \end{bmatrix} = \underset{V}{\boxplus} \begin{bmatrix} B \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} A \end{bmatrix} \begin{bmatrix} B \end{bmatrix} dV, \qquad (2.9)$$

представляющей собой математическую запись физической связи между реакциями в узлах элемента и узловыми перемещениями. При известной геометрии конечного элемента и заданных упругих характеристиках материала матрица [*K*] вполне определяется выбором аппроксимирующих функций:

$$[B] = [D] [\phi_l(x)], \qquad (2.10)$$

где [D] – матрица дифференцирования:

$$[D] = \begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial x} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{\partial}{\partial y} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{\partial}{\partial z} \\ \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial z} & 0 \\ 0 & \frac{\partial}{\partial z_2} & \frac{\partial}{\partial y} \\ \frac{\partial}{\partial z} & 0 & \frac{\partial}{\partial x} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial x_1} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{\partial}{\partial x_2} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{\partial}{\partial x_3} \\ \frac{\partial}{\partial x_2} & \frac{\partial}{\partial x_1} & 0 \\ 0 & \frac{\partial}{\partial x_3} & \frac{\partial}{\partial x_2} \\ \frac{\partial}{\partial x_3} & 0 & \frac{\partial}{\partial x_1} \end{bmatrix}.$$
(2.11)

При этом коэффициенты матрицы жесткости [*K*] оказываются таковыми, что обеспечивают минимум потенциальной энергии деформации конечного элемента.

3. Сборка глобальной матрицы жесткости конечно-элементной системы в соответствии с (2.8).

4. Решение системы линейных алгебраических уравнений (2.7) с использованием специальных методов и программ, учитывающих симметрию и структуру матрицы жесткости системы (ее редкозаполненность, или ленточность). В простейшем случае могут быть использованы методы Гаусса или Холесского.

В результате решения системы (2.7) вычисляется вектор {*u*} узловых перемещений, позволяющих вычислить векторы деформаций {ε} и напряжений {σ}:

$$\{\epsilon\} = [D] \{u\}; \{\sigma\} = [A] \{\epsilon\}.$$
(2.12)

Таким образом, схема алгоритма базовой вычислительной модели статического упругого анализа (БВМСУА) имеет вид (рисунок 2.1).



Рисунок 2.1 – Схема алгоритма базовой вычислительной модели статического упругого анализа

Рассматриваемые в дальнейшем технические объекты предполагаются выполненными из металлов или полимерных композиционных материалов. В связи с этим используются матрицы жесткости изотропного (металлы) (2.13) и ортотропного (композиты) (2.14) материалов:

$$[A] = \begin{bmatrix} \frac{1}{E} & \frac{-\nu}{E} & \frac{-\nu}{E} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{-\nu}{E} & \frac{1}{E} & \frac{-\nu}{E} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{-\nu}{E} & \frac{-\nu}{E} & \frac{1}{E} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G} \end{bmatrix},$$
(2.13)
$$[A] = \begin{bmatrix} \frac{1 - v_{yz}v_{zy}}{E_y E_z \Delta} & \frac{v_{yx} + v_{zx}v_{yz}}{E_y E_z \Delta} & \frac{v_{zx} + v_{yx}v_{zy}}{E_y E_z \Delta} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{v_{xy} + v_{xz}v_{zy}}{E_z E_x \Delta} & \frac{1 - v_{zx}v_{xz}}{E_z E_x \Delta} & \frac{v_{zy} + v_{zx}v_{xy}}{E_z E_x \Delta} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{v_{xz} + v_{xy}v_{yz}}{E_x E_y \Delta} & \frac{v_{yz} + v_{xz}v_{yx}}{E_x E_y \Delta} & \frac{1 - v_{xy}v_{yx}}{E_x E_y \Delta} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2 \cdot G_{yz} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 2 \cdot G_{zx} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2 \cdot G_{xy} \end{bmatrix}, \quad (2.14)$$

где 
$$\Delta = \frac{1 - v_{xy}v_{yx} - v_{yz}v_{zy} - v_{zx}v_{xz} - 2 \cdot v_{xy}v_{yz}v_{zx}}{E_x E_y E_z}.$$

Для принятых в настоящей диссертационной работе типов конечных элементов аппроксимирующие функции определяются следующим образом.

Для пространственного 3-х узлового линейного конечного элемента (балка) (рисунок 2.2, а), используемого для моделирования стержня как пространственной одномерной системы, функции формы, описывающие перемещения произвольной точки конечного элемента, имеют вид:

$$u = \frac{1}{2} (u_{I}(-s+s^{2}) + u_{J}(s+s^{2})) + u_{K}(1-s^{2});$$

$$v = \frac{1}{2} (v_{I}(-s+s^{2}) + v_{J}(s+s^{2})) + v_{K}(1-s^{2});$$

$$w = \frac{1}{2} (w_{I}(-s+s^{2}) + w_{J}(s+s^{2})) + w_{K}(1-s^{2});$$

$$\theta_{x} = \frac{1}{2} (\theta_{xI}(-s+s^{2}) + \theta_{xJ}(s+s^{2})) + \theta_{xK}(1-s^{2});$$

$$\theta_{y} = \frac{1}{2} (\theta_{yI}(-s+s^{2}) + \theta_{yJ}(s+s^{2})) + \theta_{yK}(1-s^{2});$$

$$\theta_{z} = \frac{1}{2} (\theta_{zI}(-s+s^{2}) + \theta_{zJ}(s+s^{2})) + \theta_{zK}(1-s^{2}),$$
(2.15)

где u, v, w – смещения произвольной точки конечного элемента в направлении осей x, y, z;  $u_I, u_J, ..., v_I, v_J, ..., w_I, w_J, ...$  – смещения узлов I, J, ... в направлении осей x, y, z;  $\theta_x, \theta_y, \theta_z$  – повороты узлов I, J, ... относительно осей x, y, z; s – положение точки на стержне (координата точки в локальной системе координат конечного элемента).

Для объемного 20-и узлового призматического конечного элемента (массив) (рисунок 2.2, б), используемого для моделирования конструкции как трехмерного тела, функции формы, описывающие перемещения произвольной точки конечного элемента, имеют вид:

$$u = \frac{1}{8} (u_{I}(1-s)(1-t)(1-r)(-s-t-r-2) + u_{J}(1+s)(1-t)(1-r)(s-t-r-2) + u_{K}(1+s)(1+t)(1-r)(s+t-r-2) + u_{L}(1-s)(1+t)(1-r)(-s+t-r-2) + u_{M}(1-s)(1-t)(1+r)(-s-t+r-2) + u_{M}(1-s)(1-t)(1+r)(-s-t+r-2) + u_{Q}(1+s)(1+t)(1+r)(s+t+r-2) + u_{P}(1-s)(1+t)(1+r)(-s+t+r-2)) + (2.16)$$

$$\frac{1}{4} (u_{Q}(1-s^{2})(1-t)(1-r) + u_{R}(1+s)(1-t^{2})(1-r) + u_{S}(1-s^{2})(1+t)(1-r) + u_{T}(1-s)(1-t^{2})(1-r) + u_{U}(1-s^{2})(1-t)(1+r) + u_{V}(1+s)(1-t^{2})(1+r) + u_{V}(1-s)(1-t^{2})(1+r) + u_{X}(1-s)(1-t^{2})(1+r) + u_{X}(1-s)(1-t^{2})(1+r) + u_{X}(1-s)(1-t^{2})(1+r) + u_{X}(1-s)(1-t)(1-r^{2}) + u_{A}(1+s)(1+t)(1-r^{2}) + u_{B}(1-s)(1+t)(1-r^{2});$$

$$v = \frac{1}{8} (v_{I}(1-s) \dots (\text{аналогично } u \text{ с перестановкой индексов});$$

$$v = \text{Смещения произвольной точки конечного элемента в направлении осей } x = v, z;$$

где u, v, w – смещения произвольной точки конечного элемента в направлении осей x, y, z;  $u_I, u_J, ..., v_I, v_J, ..., w_I, w_J, ...$  – смещения узлов I, J, ... в направлении осей x, y, z; s, r, t – координата точки в локальной системе координат конечного элемента.



Рисунок 2.2 – Типы конечных элементов, используемые при моделировании стержневых конструкций: а – пространственный 3-х узловой; б – объемный 20-и узловой

Рассмотренная вычислительная модель используется в дальнейшем в качестве самостоятельного модуля (БВМСУА) при построении сложных вычислительных моделей живучести стержневых конструкций.

### 2.2 Вычислительные модели физико-технических эффектов поведения повреждаемых стержневых конструкций

В настоящем подразделе рассматриваются вычислительные модели физико-технических эффектов, могущих возникнуть в стержневых конструкциях при возникновении и развитии повреждений и/или в запроектных условиях нагружения. Минимальный перечень таких эффектов включает в себя возникновение геометрической нелинейности, упругопластических деформаций, изменение условий контактного взаимодействия деталей, изменение силового потока (и, соответственно, расчетной схемы) вследствие развития повреждений, потерю устойчивости стержневых элементов. При этом для задач, когда матрица [*K*] зависит от искомых перемещений или их производных, система уравнений (2.7) становится нелинейной. Типовой процедурой решения нелинейных уравнений является итерационный метод решения Ньютона-Рафсона [89]. Тогда решение записывается в виде

$$\left[K_{i}^{T}\right]\!\left\{\Delta u_{i}\right\} = \left\{F\right\} - \left\{F_{i}^{nr}\right\}\!,\tag{2.17}$$

$$\{u_{i+1}\} = \{u_i\} + \{\Delta u_i\}, \tag{2.18}$$

где  $[K_i^T]$  – касательная (тангенциальная) матрица жесткости, т.е. матрица, состоящая из основной матрицы жесткости, к которой добавлена согласованная матрица жесткости при изменении усилий (перемещений);

 $\{F_i^{nr}\}$  – вектор восстанавливающих сил, равных и направленных противоположно внутренним силам в элементах и восстанавливающих состояние равновесия; і – индекс текущей инерции поиска равновесного состояния.

 $[K_i^T]$  и  $\{F_i^{nr}\}$  оцениваются для текущих значений  $\{u_i\}$ . Правая часть (2.17) – невязки, или вектор неуравновешенных сил.

Решение (2.7) с учетом (2.17), (2.18) осуществляется с использованием следующей процедуры (рисунок 2.3):

а) определяется  $\{u_0\}$ . Обычно  $\{u_0\}$  принимается на базе сошедшегося решения на предыдущей итерации. Для начального момента времени  $\{u_0\}=0$ ;

б) вычисляется  $\{\Delta u_i\}$  из (2.17);

в) добавляется  $\{\Delta u_i\}$  к  $\{u_i\}$  для получения следующей аппроксимации  $\{u_{i+1}\}$  в соответствии с (2.18);

д) шаги б) – г) повторяются до сходимости решения, т.е. до снижения невязок  $\{F\} - \{F_i^{nr}\}$ ниже заданной величины ошибки.

Итерационная процедура метода Ньютона-Рафсона является составной частью ряда рассматриваемых далее вычислительных моделей.



Рисунок 2.3 – Графическая интерпретация метода Ньютона-Рафсона

Для стержневых систем на стадии живучести геометрическая нелинейность проявляется в том, что абсолютные деформации (перемещения) становятся большими, а относительные деформации остаются малыми. В этом случае уравнения равновесия надо составлять для деформированного состояния: матрица жесткости зависит от перемещений и разрешающая система уравнений становится нелинейной. Она решается с помощью итерационной процедуры метода Ньютона-Рафсона, при этом касательная матрица жесткости учитывает изменение геометрии при переходе от итерации к итерации [57]. При наличии повреждений, разрушений, запроектном нагружении нарушаются условия упругого деформирования конструкционного материала и возникают эффекты упругопластического деформирования. Базой для выбора определяющих уравнений состояния являются соотношения теории пластичности. В настоящей диссертационной работе принято использование определяющих уравнений теории пластического течения. При этом будем руководствоваться следующими общепринятыми положениями.

В качестве условия текучести (пластичности) используется уравнение Губера-Мизеса (условие постоянства интенсивности напряжений). Для идеального пластического материала оно принимает вид:

$$f_{y} = \sigma_{e} - \sigma_{T} = 0; \ \sigma_{e} = \left(\frac{1}{2}|\sigma_{1} - \sigma_{2}|^{2} + |\sigma_{2} - \sigma_{3}|^{2} + |\sigma_{3} - \sigma_{1}|^{2}\right)^{\frac{1}{2}}$$
(2.19)

Для материала с изотропным упрочнением условие текучести (2.19) принимает вид:

$$f_y = \sigma_e - \sigma_y(\xi) = 0, \qquad (2.20)$$

1

где  $\sigma_y(\zeta)$  – монотонно возрастающая функция параметра упрочнения  $\zeta$ , характеризующего величину накопленной работы пластических деформаций, выполненной в течение всей истории нагружения. Уравнение (2.20) является уравнением поверхности нагружения, которая равномерно расширяется, оставаясь подобной сама себе, с ростом пластической деформации. Функция  $\sigma_y(\zeta)$  является математическим выражением ветви упрочнения диаграммы деформирования.

Определяющие уравнения теории пластического течения записываются в виде ассоциированного закона течения

$$d\varepsilon_{ij} = \lambda_{pl} \frac{\partial f_y}{\partial \sigma_{ij}}, \qquad (2.21)$$

который позволяет определить приращения пластических компонентов деформации при помощи условия пластичности (2.20) через одну неизвестную величину λ<sub>pl</sub> (пластический множитель), подлежащую определению. Укрупненно вычислительная модель упругопластического деформирования (ВМУПД) имеет следующий вид (рисунок 2.4) [91].

При анализе живучести возникает необходимость решать задачи контактного взаимодействия элементов конструкции (преимущественно в узлах сочленения стержневых элементов). Это обусловлено изменением условий взаимодействия элементов при наличии повреждений или запроектных нагрузках. Технология конечно-элементного решения (вычислительная модель) задачи контактного взаимодействия сводится к следующему. Рассматривается сетка конечных элементов на предполагаемых контактных поверхностях тел, одно из которых (более жесткое) считается пассивным, а второе – активным. Соответственно, узлы сетки конечных элементов на поверхности пассивного тела называются пассивными, на поверхности активного тела – активным.



Рисунок 2.4 – Схема алгоритма вычислительной модели упругопластического деформирования

Общее уравнение равновесия дискретной (конечно-элементной) модели (2.7) рассматривается как нелинейное, поскольку в процессе контактного взаимодействия тел матрица коэффициентов (жесткости) [K] оказывается зависящей от неизвестных перемещений {u}.

Решение задачи контактного взаимодействия осуществляется в два этапа [91]:

1) определение геометрии взаимного проникновения контактирующих тел;

2) определение контактных сил, препятствующих этим взаимным проникновениям, исходя из решения уравнений равновесия (движения).

При определении геометрии взаимного проникновения контактирующих тел проверяется возможность проникновения активных узлов через поверхность возможного контакта пассивного тела. Если виртуальное проникновение произошло (т.е. возможно исходя из жесткости активного тела), предполагается, что активное тело находится в контакте с пассивным телом. Для проверки возможности проникновения каждого активного узла через поверхность пассивного тела используется итерационная процедура метода Ньютона-Рафсона.

Определение контактных сил, препятствующих взаимным проникновениям, осуществляется с использованием расширенного метода Лагранжа, основанного на методе штрафных функций с расширенным контролем внедрения. В этом случае роль множителей Лагранжа выполняют неизвестные (искомые) сосредоточенные контактные силы. Численное решение получается итерационным методом сопряженных градиентов.

Тогда вычислительная модель контактного взаимодействия (ВМКВ) имеет следующий вид (рисунок 2.5).



Рисунок 2.5 - Схема алгоритма вычислительной модели контактного взаимодействия

Анализ потери устойчивости [42, 146] выполняется путем решения уравнения

$$\left(\!\left[K\right]\!+\lambda\!\left[K_{\Gamma}\right]\!\right)\!\cdot\!\left\{\!\psi\right\}\!=\!0,\qquad(2.22)$$

где  $\lambda$  – безразмерный множитель (коэффициент, на который необходимо умножить нагрузку, чтобы возникла потеря устойчивости); { $\psi$ } – форма потери устойчивости; [ $K_{\Gamma}$ ] – геометрическая матрица жесткости (матрица, учитывающая изменение изгибной жесткости стержня в зависимости от величины продольной силы).

Для решения уравнения (2.22) необходимо приравнять к нулю определитель

$$\left[ \begin{bmatrix} K \end{bmatrix} + \lambda \begin{bmatrix} K_T \end{bmatrix} = 0.$$
 (2.23)

Раскрыв определитель, получим уравнение степени *n* относительно параметра нагрузки λ. Наименьший корень данного уравнения представляет собой критическое значение параметра нагрузки  $\lambda_{\kappa p}$ . Вектор перемещений { $\psi$ }, характеризующий форму потери устойчивости, выполняется подстановкой величины  $\lambda_{\kappa p}$  в уравнение (2.22).

Линейный анализ устойчивости методом конечных элементов проводится в два этапа [146]. На первом этапе решается задача линейной статики для конструкции, нагруженной комплексом внешних нагрузок  $\{F\}$ . Определяется статическая форма равновесия и соответствующее ей распределение внутренних усилий в элементах. На втором этапе вычисляется геометрическая матрица жесткости конструкции соответствующая этим внутренним усилиям, и затем находятся корни уравнения (2.23) и соответствующие им формы потери устойчивости.

Вычислительная модель потери устойчивости (ВМПУ) схематично представлена на рисунке 2.6.



Рисунок 2.6 – Вычислительная модель потери устойчивости

Таким образом, в подразделах 2.1, 2.2 определено содержание вычислительных моделей статического упругого анализа (БВМСУА), упругопластического деформирования (ВМУПД), контактного взаимодействия (ВМКВ), потери устойчивости (ВМПУ), используемые в дальнейшем при разработке алгоритмов и конструировании вычислительных моделей анализа живучести. Применение БВМСУА, ВМУПД, ВМКВ, ВМПУ в качестве самостоятельных модулей сложных вычислительных моделей определяет однозначную трактовку той их части, которая связана с анализом НДС повреждаемых конструкций и позволяет сосредоточиться на специфических аспектах анализа живучести.

# 2.3 Особенности и инженерная методика анализа напряженно-деформированного состояния повреждаемых стержневых конструкций в динамической постановке

При решении задач в динамической постановке как исходные, так и результирующие величины предполагаются зависящими от времени. Вдобавок к величинам, рассматриваемым при решении задач в статической постановке, во внимание принимаются скорости, ускорения и характеристики демпфирования деформируемого тела. Тогда разрешающая система уравнений механики деформирования в линейной и нелинейной постановках в матричной форме принимает соответственно вид

$$[M]{u''(t)} + [C]{u'(t)} + [K]{u(t)} = {F(t)},$$

$$[M]{u''(t)} + [C]{u'(t)} + {F^{i}(t)} = {F^{a}(t)},$$
(2.24)

где [*M*], [*C*] – соответственно матрицы масс и демпфирования конечно-элементной модели;  $\{u''(t)\}, \{u'(t)\}, \{u(t)\}$  – соответственно векторы узловых ускорений, скоростей и перемещений;  $\{F(t)\}, \{F^i(t)\}, \{F^a(t)\}$  – соответственно векторы узловых ускорений, скоростей и перемещений, вектор внутренних и внешних (приложенных) узловых сил в функции времени *t*.

Уравнения (2.24) можно рассматривать как используемый при динамических расчетах аналог уравнения (2.7). Действительно, (2.24) отличается от (2.7) только наличием первых двух слагаемых, обеспечивающих учет ускорений и скоростей, масс, сосредоточенных в узлах сетки конечных элементов. Однако принципиальная разница заключается в том, что если (2.7) представляют собой систему линейных алгебраических уравнений, то (2.24) – систему дифференциальных уравнений. В связи с этим применяются и другие подходы к вычислению вектора  $\{u\}$  узловых перемещений при решении (интегрировании) системы уравнений (2.24).

Динамическое поведение конструкций непосредственно определяется их динамическими характеристиками – частотами и формами собственных колебаний. Расчет свободных колебаний проводится без учета динамических нагрузок в соответствии с дифференциальным уравнением

$$[M]{u''} + [K]{u} = 0, \qquad (2.25)$$

являющимся частным случаем общего уравнения движения (2.24)

В силу упругого поведения конструкции ожидаемый отклик является гармоническим в соответствии с выражением:

$$\{u\} = \{\varphi_i\} \cos\left(\omega_i t\right),\tag{2.26}$$

где  $\{\varphi_i\}$  – собственный вектор, определяющий форму колебаний *i*-й моды,  $\omega_i$  – собственная частота для этой моды.

Собственные частоты  $\omega_i$  находят решением уравнения

$$([K] - \omega_i^2 [M]) \{ \varphi_i \} = 0.$$
(2.27)

При решении задач анализа деформирования повреждаемых конструкций в динамической постановке существует ряд альтернативных подходов, выбор между которыми определяет адекватность учета возникающих при разрушении физико-технических эффектов и достоверность получаемых результатов. Это касается выбора технологии моделирования разрушения отдельных структурных элементов – стержней и метода динамического анализа (численного решения уравнений 2.24).

Возможные варианты технологий моделирования разрушения стержней. По литературным данным при решении задач динамического анализа повреждаемых конструкций практически используются две технологии моделирования разрушения структурных элементов – их удаление из расчетной модели или использование вычислительной технологии «рождения и смерти элементов» (РСЭ).

Применительно к разрушению стержня технология РСЭ заключается в мгновенном уменьшении жесткости конечных элементов (в современных САЕ-системах по умолчанию в 10<sup>6</sup> раз, но эту величину можно изменять) в разрушаемом сечении стержня, в результате чего он хотя и остается в системе, но фактически перестает сопротивляться деформациям (что принято считать равносильным исчезновению из силовой схемы).

Динамические свойства определяются величиной и распределением массы и жесткости конструкции по занимаемому ей пространству. С этих позиций при разрушении структурного элемента динамические свойства конструкции должны меняться за счет изменения жесткости, но не за счет изменения массы. Очевидно, удаление стержня не соответствует этим требованиям: полностью теряется и жесткость, и масса разрушенного стержня. При использовании технологии РСЭ остается масса, а жесткость значительно уменьшается, но все же не до нуля. При этом неизученным является вопрос о возможности влияния «умершего» конечного элемента, имеющего очень малую, но не нулевую, жесткость, на динамические характеристики конструкции.

Предлагается рассмотреть еще один вариант технологии – разрезание стержня в сечении, предполагаемом разрушенным (замена одного стержня двумя). Этот случай представляется наиболее соответствующим физической реальности разрушения структурного элемента: полностью остается масса, но исчезает жесткость. Поясним указанные технологии следующей схемой (рисунок 2.7). Анализ конструкции с удаленным стержнем предполагает отсутствие стержня 1-2, с разрезанным стержнем – замену стержня 1-2 стержнями 1-3 и 3-2 с разрывом связи в точке 3. При использовании технологии РСЭ в разрушаемом сечении стержня 1-2 генерируется «умирающий» конечный элемент 4-5 с пониженным модулем Юнга.



Рисунок 2.7 – Схема модификации разрушаемого структурного элемента: 1, 2 – концевые точки стержня; 3 – точка разрезания стержня, 4, 5 – узловые точки конечного элемента с уменьшенным значением модуля Юнга

Таким образом, далее рассматриваются три возможных варианта технологии моделирования разрушения структурного элемента, два из которых предполагают модификацию геометрической, а один – конечно-элементной модели.

Влияние технологии моделирования разрушения структурного элемента на расчетные оценки динамических характеристик. Каковы отличия результатов, получаемых при удалении структурного элемента и при его виртуальном разрезании разными способами (модификацией геометрической или конечно-элементной модели)? Для ответа на этот вопрос рассмотрим решение следующей модельной задачи.

Рассматривается пространственная стержневая конструкция рамного типа (с жесткими соединениями стержней), включающая в себя 34 стержня и представленная двумя ярусами, содержащими вертикальные стойки с горизонтальными и перекрестными (раскосы) связями (рисунок 2.8). Высота, ширина, глубина одного яруса составляет 120 мм. Стальные стержневые элементы имеют круглое поперечное сечение диаметром 1,75 мм. Предполагается жесткая заделка в четырех точках – нижних точках четырех стоек.

Прототипом такой конструкции являются различные варианты конструктивного исполнения широко распространенных типов технических объектов, а именно, несущих строительных конструкций типа промышленных этажерок, сварные металлоконструкции портальных и козловых кранов, перегружателей. Очевидно, результаты решения одной модельной задачи не дают оснований для серьезных обобщений. Но продемонстрировать характерные результаты применения каждой технологии они все же позволяют.

При использовании технологии РСЭ уменьшение модуля Юнга «умершего» конечного элемента по умолчанию 10<sup>6</sup> раз представляет собой некоторую условность. В связи с этим для

оценки влияния этого фактора модуль Юнга при проведении вычислительных экспериментов уменьшался как в 10<sup>6</sup>, так и в 10<sup>7</sup> раз.



Рисунок 2.8 – Геометрическая схема модельной конструкции (размеры в мм)

Расчетная оценка динамических свойств (во внимание примем низшую собственную форму свободных колебаний) будет осуществляться по результатам стандартной процедуры линейного модального анализа (2.27). В результате модального анализа получены следующие оценки низшей частоты (с округлением до целых значений): неповрежденная конструкция – 269 Гц, с удаленным стержнем – 269 Гц (рисунок 2.9, а), с разрезанным стержнем – 153 Гц (рисунок 2.9, б), с ослабленным стержнем (технология РСЭ с уменьшением модуля Юнга в  $10^6$  раз) – 150 Гц (рисунок 2.9, в), с ослабленным стержнем (технология РСЭ с уменьшением модуля Юнга в  $10^6$  раз) – 63 Гц (рисунок 2.9, г).



Рисунок 2.9 – Низшая собственная форма свободных колебаний при удалении (а), разрезании (б) стержня, введении ослабленного (модуль Юнга уменьшен в 10<sup>6</sup> (в) и 10<sup>7</sup> (г) раз) стержня: 1 – удаленный; 2 – разрезанный; 3 – ослабленный стержни

Неизменность низшей частоты при удалении стержня обусловлена тем, что удален лишь один из стержней, вносящих вклад в низшую форму колебаний неповрежденной конструкции: оставшиеся стержни колеблются с той же частотой. Удаление стержня приводит к снижению массы конструкции всего на 3,4%, однако варианты с удаленным и разрезанным стержнем приводят к существенно различным частотам (269 и 153 Гц) и формам (рисунок 2.9, а, б). Введение ослабленного конечного элемента по технологии РСЭ при уменьшении модуля Юнга в  $10^6$  раз приводит к результатам, близким к таковым для варианта с разрезанным стержнем как по частотам (150 и 153 Гц), так и по формам (рисунок 2.9, б, в). Однако дальнейшее уменьшение жесткости ослабленного элемента порождает формы, связанные с колебанием только самого этого элемента (рисунок 2.9, г), и приводит к резкому уменьшению низшей частоты (в рассматриваемом примере до 63 Гц).

Рассматриваемый пример показывает, что, применение той или иной технологии моделирования разрушения структурного элемента вносит фактически определяющий вклад в достоверность оценок динамических характеристик.

Имея в качестве цели только анализ собственных частот и форм свободных колебаний целесообразно использовать технологию моделирования разрушения путем геометрической модификации модели – разрезанием стержня в месте предполагаемого разрушения. Как удаление стержня, так и введение ослабленного стержня с целью имитации технологии РСЭ могут привести к существенно отличным – и по формам, и по частотам – результатам анализа свободных колебаний.

Методы решения уравнений движения. Относительно рассмотренных трех вариантов технологии моделирования разрушения стержня необходимо отметить следующее. Эти технологии могут быть применены к различным типам моделей конструкции: удаление и разрезание стержня возможно только в геометрической (до начала процесса решения), применение технологии РСЭ – только в численной (конечно-элементной) модели непосредственно в процессе решения задачи. То есть, рекомендованная для анализа только собственных частот и форм свободных колебаний технология разрезания стержня модификацией геометрической модели не может быть применена к решению уравнений движения (2.24). Единственный вариант – технология РСЭ, но, как показано, он может привести к существенному искажению динамических характеристик.

Для задач динамического анализа обычно рассматриваются две технологии: 1) выполнение модального анализа и использование его результатов при решении уравнений движения методом разложения по собственным формам; 2) непосредственное решение полной системы уравнений движения. Указанные особенности влияния технологии РСЭ на результаты модального анализа приводят к необходимости использования только решения полной системы уравнений движения.

Известны два основных подхода к решению дифференциальных уравнений движения (2.24) с использованием методов интегрирования шагового типа по времени:

неявные методы интегрирования, основанные на схеме Ньюмарка;

явные методы интегрирования, основанные на использовании метода центральных разностей, когда ускорение полагается постоянным в пределах шага интегрирования.

Области и особенности использования этих методов определяются следующим образом. Область наиболее эффективного применения явных методов – быстропротекающие процессы с локализацией в ограниченной области. Основная задача при использовании этих методов – анализ локального отклика конструкции на динамическое воздействие. Основная задача при использовании неявных методов – анализ глобального отклика конструкции на динамическое воздействие. С этих позиций, рассматривая в качестве цели анализ поведения самого разрушаемого стержня, следовало бы отдать предпочтение явному интегрированию. Напротив, анализируя отклик всей конструкции на разрушение отдельного структурного элемента, целесообразно использовать неявное интегрирование.

В качестве дополнительного аргумента примем во внимание предполагаемую длительность процесса разрушения стержня – перехода конструкции из одного состояния в другое в связи с потерей несущей способности структурного элемента. Предполагаемая нулевая длительность структурной перестройки силовой конструкции при разрушении структурного элемента и явное интегрирование уравнений движения приводят к результатам, с одной стороны соответствующим наихудшему случаю, с другой – к существенным ошибкам в прогнозировании динамического поведения, завышая пиковые значения напряжений и деформаций.

В соответствии с [44] под мгновенным разрушением в технических объектах понимается разрушение, продолжительность реализации которого исчисляется десятыми и сотыми долями секунды. Предположение длительности разрушения, измеряемой десятыми и сотыми долями секунды, дает основание отдать предпочтение неявному интегрированию.

Таким образом, в целях исследования живучести стержневой конструкции при разрушении отдельных ее структурных элементов целесообразно использовать прямое неявное интегрирование уравнений движения.

Рассмотрим более подробно схему Ньюмарка в методах неявного интегрирования уравнений динамики.

В этих методах векторы перемещений  $\{u_{i+1}\}$ , скоростей  $\{u'_{i+1}\}$ , ускорений  $\{u''_{i+1}\}$ , относящиеся к некоторому моменту времени  $t_{i+1} = t_i + \Delta t$  ( $\Delta t$  – шаг интегрирования), вычисляется через их значения, найденные на предыдущих шагах. Схема Ньюмарка основана на следующих (независимых) разложениях  $\{u(t_{i+\tau})\}$  и  $\{u'(t_{i+\tau})\}$  в ряды по степеням  $\tau$ :

$$\{u(t_{i+\tau})\} = \{u_i\} + \tau\{u_i'\} + \frac{\tau^2}{2}\{u_i''\} + \alpha\tau^3\{u_i'''\};$$

$$\{u'(t_{i+\tau})\} = \{u_i'\} + \tau\{u_i''\} + \beta\tau^2\{u_i'''\}.$$

$$(2.28)$$

Здесь удержаны члены, содержащие вектор  $\{u'''\}$ . Коэффициенты  $\alpha$  и  $\beta$  выбираются так, чтобы обеспечить устойчивость процесса интегрирования.

Полагая  $\tau = \Delta t$  и заменяя  $\{u_i''\}$  приближенным отношением  $(\{u_{i+1}''\} - \{u_i''\}) / \Delta t$ , приходим к равенствам

$$\{u_{i+1}\} = \{u_i\} + \Delta t \{u'_i\} + \frac{\Delta t^2}{2} \{u''_i\} + \alpha \Delta t^2 (\{u''_{i+1}\} - \{u''_i\}); \{u'_{i+1}\} = \{u'_i\} + \Delta t \{u''_i\} + \beta \Delta t (\{u''_{i+1}\} - \{u''_i\}).$$

$$(2.29)$$

Найдем из первого равенства  $\{u''_{i+1}\}$ :

$$\{u_{i+1}''\} = \frac{1}{\alpha t^2} \left(\{u_{i+1}\} - \{u_i\}\right) - \frac{1}{\alpha \Delta t} \{u_i'\} + \left(1 - \frac{1}{2\alpha}\right) \{u_i''\}.$$
(2.30)

Подстановка этого результата в выражение для  $\{u'_{i+1}\}$  дает формулу

$$\{u_{i+1}'\} = \frac{\beta}{\alpha \Delta t} \left(\{u_{i+1}\} - \{u_i\}\right) + \left(1 - \frac{\beta}{\alpha}\right) \left\{u_i\} + \frac{\Delta t}{2} \left(2 - \frac{\beta}{\alpha}\right) \left\{u_i''\},\tag{2.31}$$

которая в совокупности с (2.30) составляет рекуррентные соотношения схемы Ньюмарка.

Такой подход используется при решении динамических задач в среде модуля *Structural Transient* пакета *ANSYS*. Его особенностью является то, что на каждом шаге интегрирования по времени осуществляется формулировка глобальной матрицы жесткости системы и вычисление вектора смещений всех ее узлов. Таким образом, на каждом шаге интегрирования по времени фактически решается квазистатическая задача, что предъявляет высокие требования к вычислительным ресурсам.

Таким образом, при численном решении (интегрировании) системы дифференциальных уравнений динамики (2.24) вычисляется матрица перемещений  $\{u(t)\}$  как функция времени. На следующем шаге вычисляются деформации и напряжения аналогично (2.12), но матрицы деформаций и напряжений также являются функциями времени:

$$\{\varepsilon(t)\} = [D]\{u(t)\}; \qquad \{\sigma(t)\} = [A]\{\varepsilon(t)\}.$$
(2.32)

В общем виде матрица демпфирования [С] в (2.24) определяется как

$$[C] = \alpha[M] + \beta[K] + \sum_{j=1}^{N_{mat}} \beta_j[K_j] + \beta_c[K] + [C_{\zeta}] + \sum_{k=1}^{N_{ele}} [C_k], \qquad (2.33)$$

где  $\alpha$ ,  $\beta$  – коэффициенты пропорциональности соответственно массы и жесткости в модели пропорционального демпфирования Рэлея ([*C*] =  $\alpha$ [*M*] +  $\beta$ [*K*]);  $\beta_j$  – постоянный множитель к матрице жесткости [*K<sub>j</sub>*] *j*-го материала (*j* = 1,*N<sub>mat</sub>*);  $\beta_c = \zeta/(\pi f)$  – переменный множитель к матрице жесткости для обеспечения независимости степени демпфирования  $\zeta$  от частоты колебаний *f*; [*C<sub>ζ</sub>*] – матрица демпфирования, зависящая от частоты; [*C<sub>k</sub>*] – матрица демпфирования *k*-го элемента (*k* = 1,*N<sub>ele</sub>*); *N<sub>ele</sub>* – число элементов, имеющих собственную матрицу демпфирования.

Использование тех или иных компонент матрицы демпфирования (2.33) зависит от типа решаемой задачи и от информационной обеспеченности расчета (доступности информации о демпфирующих свойствах материалов и конструкций).

Инженерная методика анализа напряженно-деформированного состояния. Рассмотрим практическую технологию получения инженерных оценок НДС повреждаемых стержневых конструкций, ориентированную на использование в сочетании с современным пакетом конечно-элементного моделирования (класса ANSYS, ADAQUS, COMSOL и т.п.). При этом предполагается использование штатных инструментов используемой CAE-системы и стандартных процедур численного анализа.

1. Определение сценария разрушения и анализ устойчивости. Сценарий разрушения определяет, какие структурные элементы стержневой конструкции, и в какой последовательно-

сти будут считаться разрушенными. Основанием для определения сценария может быть как анализ НДС конструкции, так и соображения, не связанные с механикой деформирования и разрушения (подраздел 1.3). Однако определение глубины сценария – количества последовательно разрушаемых структурных элементов – должно сопровождаться анализом устойчивости после разрушения каждого стержня: очевидно, после потери устойчивости дальнейшее моделирование последовательного разрушения теряет физико-технический смысл.

2. Выполнение модального анализа повреждаемой конструкции с виртуальным разрезанием разрушаемых стержней путем модификации геометрической модели. Это позволит определить наиболее адекватные оценки динамических характеристик. При необходимости анализа некоторого сценария развития повреждений, предполагающего *m* событий последовательного разрушения отдельных стержней, удовлетворяющих условию отсутствия потери устойчивости (п. 1), модальный анализ выполняется *m* раз – для каждого поврежденного состояния. При этом с учетом комплекса приложенных нагрузок и воздействий решается уравнение

$$\left(\omega_{i}\left[M\right]+\left[K^{T}\right]\right)\cdot\left\{\psi_{i}\right\}=\left\{0\right\},$$
(2.34)

где  $\omega_i$ , { $\psi_i$ } – круговая частота и вектор *i*-й собственной формы; [ $K^T$ ] – тангенциальная матрица жесткости для рассматриваемого случая нагружения, учитывающая собственное НДС конструкции, выраженное через перемещения узлов. Связь между круговыми частотами  $\omega_i$ , выражаемыми в рад/с, и используемыми в инженерной практике частотами  $f_i$ , определяется соотношением  $f = \omega/(2\pi)$ .

Общепринято принимать во внимание количество форм колебаний, в которых участвует не менее 90% массы конструкции, фактически оно носит внеотраслевой характер. Таким образом, определяются соответствующие этому положению собственные формы и частоты колебаний  $f_{ij}$  (i = 1,k; j = 1,m) конструкции во всех *m* рассматриваемых поврежденных состояниях (k – количество форм, в колебаниях по которым участвуют не менее 90% массы).

3. Определение характеристик демпфирования повреждаемой конструкции. При анализе переходных процессов этот фактор является одним из определяющих при обосновании достоверности численных результатов. Учет этого фактора осуществим следующим образом. С учетом информационной обеспеченности при решении практических задач уравнение (2.33) запишем в виде

$$[C] = \alpha[M] + \beta[K], \qquad (2.35)$$

где параметры α и β определяются как

$$\alpha = 2\xi \frac{\omega_{\min} \omega_{\max}}{\omega_{\min} + \omega_{\max}}; \qquad \beta = \frac{2\xi}{\omega_{\min} + \omega_{\max}}, \qquad (2.36)$$

 $\omega_{min}$ ,  $\omega_{max}$  – границы рассматриваемого интервала круговых частот собственных колебаний;  $\xi$  – коэффициент затухания, определяющий характер движения системы ( $\xi < 1,0$  – затухание гармонических колебаний;  $\xi = 1,0$  – критическое затухание;  $\xi > 1,0$  – закритическое затухание).

Учитывая соотношение между  $\omega$  и *f*, уравнения (2.36) запишем в виде

$$\alpha = 4\pi\xi \frac{f_{\min}f_{\max}}{f_{\min} + f_{\max}}; \qquad \beta = \frac{\xi}{\pi(f_{\min} + f_{\max})}.$$
(2.37)

Вопрос выбора значений частот  $f_{min}$ ,  $f_{max}$  ( $\omega_{min}$ ,  $\omega_{max}$ ) в (2.36), (2.37) не является жестко регламентируемым. Для систем с ограниченным числом форм собственных колебаний (модели с небольшим количеством сосредоточенных масс, малым числом степеней свободы)  $f_{min}$  и  $f_{max}$ являются границами интервала всех собственных частот. В случае систем с распределенными параметрами и весьма большим числом степеней свободы целесообразно выбрать  $f_{min}$ ,  $f_{max}$  по результатам модального анализа (п. 2) с учетом требования участия в колебаниях не менее 90% массы.

Величина коэффициента затухания для подстановки в (2.37) может быть определена через логарифмический декремент колебаний  $\delta_{mod}$  как

$$\xi = \frac{\delta_{\text{mod}}}{\sqrt{(2\pi)^2 + \delta_{\text{mod}}^2}} \,. \tag{2.38}$$

Логарифмический декремент колебаний является индивидуальной характеристикой конкретной конструкции и, фактически, достоверно может быть определен только экспериментально. В связи с этим для получения инженерных оценок целесообразно рассматривать интервал значений логарифмических декрементов для класса конструкций, аналогичных рассматриваемой. Представляется, что задание интервала, в который попадет истинное значение логарифмического декремента, более оправданно, чем принятие конкретного значения, которое почти наверняка не совпадет с истинным. При этом очевидно, и результаты определения характеристик демпфирования по формулам (2.35)-(2.38) также приобретут интервальный характер.

4. Определение длительности переходного процесса, вызванного разрушением стержневого элемента. Примем, что затухание переходного процесса означает уменьшение амплитуд колебаний в 100 раз (в зависимости от целей исследования это значение может быть принято другим). Исходя из определения логарифмического декремента колебаний, за один период амплитуда уменьшится в  $e^{\delta_{mod}}$  раз. Тогда в 100 раз амплитуда уменьшится за  $100/e^{\delta_{mod}}$  период(ов). Длительность анализируемого переходного процесса определим по наибольшему периоду – периоду низшей формы свободных колебаний:  $t_{tran} = 100/e^{\delta_{mod.}}(1/f_1)$ . В случае рассмотрения сценария – последовательности разрушения структурных элементов – определяется длительность переходных процессов, вызываемых каждым последующим событием разрушения:  $t_{tran.j} = 100/e^{\delta_{mod.}}(1/f_{1j}), j = 1,m$ .

5. Анализ переходных процессов. Моделирование разрушения стержня осуществляется с использованием технологии РСЭ (при получении численного решения невозможна модификация геометрической модели (удаление или разрезание структурного элемента)). В случае анализа сценария разрушения команда, реализующая технологию РСЭ, применяется к различным конечным элементам в соответствии с моделируемым сценарием, и активизируется в моменты времени, определяемые следующим образом. Выполнение команды, реализующей в ходе анализа сценария технологию РСЭ, на каждом шаге разрушения осуществляется после окончания переходного процесса, вызванного разрушением на предыдущем шаге – в этом случае анализируется сценарий, описывающий последовательность независимых друг от друга событий разрушения. Если команда, реализующая технологию РСЭ, выполняется до окончания переходного периода, появляется возможность анализа суперпозиции переходных процессов, порождаемых двумя хронологически последовательными событиями разрушения.

## 2.4 Апробация инженерной методики и сравнительный анализ напряженнодеформированного состояния повреждаемой пространственной стержневой конструкции в динамической и статической постановках

Предполагая, что в основе оценки живучести конструкции лежит информация о ее НДС в связи с возникновением и развитием повреждения, рассмотрим возможные альтернативы получения оценок напряжений и деформаций. В рамках настоящей работы рассматриваются следующие варианты получения таких оценок:

– статический анализ НДС: рассматриваются последовательные состояния поврежденности конструкции, для каждого из которых выполняется статический анализ (аналитический или численный) напряжений и деформаций. В этом случае получаются оценки НДС в установившемся стационарном состоянии;

– статический анализ НДС с упрощенным учетом импульсных эффектов при разрушении стержневых конструкций (мгновенном выключении связей);

– анализ переходных процессов: численное решение уравнений динамики (2.24) с использованием неявных методов интегрирования с использованием схемы Ньюмарка.

Методическое содержание первого подхода с учетом результатов подраздела 2.3 характеризуется следующим. В качестве основной технологии моделирования разрушения стержня примем его разрезание модифицированием геометрической модели. Вместе с тем, в целях сравнительного анализа рассмотрим также технологии удаления стержня и РСЭ.

Рассмотрим содержание второго подхода, основанного на использовании упрощенных энергетических схем деформирования материала (методики Г.А. Гениева). Приведем парафраз основных гипотез, положенных в основу этой методики [44]:

 под мгновенным разрушением элемента ... упруго-хрупкого материала будем понимать разрушение, продолжительность реализации которого исчисляется десятыми и сотыми долями секунды;

– при мгновенном переходе заданной *n*-раз статически неопределимой стержневой конструктивной системы ... в (*n*-1)-раз статически неопределимую систему, полная удельная энергия системы не изменяется;

 теоретическая диаграмма состояния ... принимается в виде некоторой произвольной нелинейной диаграммы (рисунок 2.10), а обобщенная диаграмма, характеризующая состояние сечения при мгновенном нагружении, в первом приближении описывается квадратной параболой;

– переход (*n*-1)-раз статически неопределимой системы в запредельное состояние при мгновенном выключении из работы элемента (узла, связи) в исходной *n*-системе характеризуется теми же критериями, что и при обычном кратковременном режиме нагружения, но с учетом изменения пределов прочности материалов, определяемых продолжительностью внешнего воздействия;

– запредельное состояние конструктивной системы при мгновенном выключении из работы элемента характеризуется либо некоторым интегральным результатом накопления повреждений в ее элементах – резервом живучести, либо локальным или прогрессирующим разрушением конструктивной системы.



Рисунок 2.10 – Общий вид диаграммы деформирования материала

Вывод основной расчетной формулы методики осуществляется следующим образом (парафраз приводится по [44]):

Простейшая нелинейная диаграмма состояния материала при кратковременном нагружении элемента, согласно принятых гипотез, может быть описана некоторой кривой, представленной на рисунке 2.10 ... обозначим величины характерных напряжений  $\sigma_n^c$ ,  $\sigma_{n-1}^c$ ,  $\sigma_{n-1}^d$ , и соответствующих им деформаций  $\varepsilon_n^c$ ,  $\varepsilon_{n-1}^c$ ,  $\varepsilon_{n-1}^d$ . Значения  $\sigma_n^c(\varepsilon_n^c)$  и  $\sigma_{n-1}^c(\varepsilon_{n-1}^c)$  могут быть получены предварительным расчетом *n* и (*n*-1)-систем. Искомой величиной является  $\sigma_{n-1}^d(\varepsilon_{n-1}^d)$ .

Хрупкое разрушение элемента *k*, например, исчерпание прочности одного из стержней фермы приведет к возникновению затухающих во времени колебаний оставшихся неразрушенных стержней, в том числе и рассматриваемого *i*-того элемента.

Для решения задачи, не прибегая к составлению и решению дифференциальных уравнений динамики стержневых систем, составим условие постоянной полной удельной энергии для *i*-того элемента.

Обозначив уровень *i*-того элемента потенциальной энергии ... величиной  $\Phi$ , определяемой интегральным выражением

$$\Phi(\varepsilon) = \int_{0}^{\varepsilon} \sigma(\varepsilon) d\varepsilon, \qquad (2.39)$$

величину удельной работы внешних сил находим как произведение  $\sigma_{n-1}^c$  на соответствующее перемещение. Условие постоянства полной удельной энергии элемента приводит к следующему аналитическому выражению для искомых значений  $\sigma_{n-1}^d$  или  $\varepsilon_{n-1}^d$ 

$$\Phi(\varepsilon_{n-1}^d) - \Phi(\varepsilon_n^c) = \sigma_{n-1}^c(\varepsilon_{n-1}^d - \varepsilon_n^c).$$
(2.40)

Действительно, при  $\sigma = E\varepsilon$ ,  $\Phi(\varepsilon) = E\varepsilon^2/2$  зависимость (2.40), записанная в напряжениях, принимает вид,

$$\frac{1}{2} \left[ (\sigma_{n-1}^d)^2 - (\sigma_n^c)^2 \right] = \sigma_{n-1}^c \cdot (\sigma_{n-1}^d - \sigma_n^c) , \qquad (2.41)$$

откуда следует выражение

$$\sigma_{n-1}^d = 2\sigma_{n-1}^c - \sigma_n^c \ . \tag{2.42}$$

Последнее выражение позволяет оценить пиковые значения динамических напряжений в момент разрушения стержневого элемента по результатам статического расчета.

Что касается содержания третьего подхода – анализа переходных процессов – оно достаточно подробно описано в подразделе 2.3.

Таким образом, возможны три варианта технологии анализа НДС в статической, и один – в динамической постановке (рисунок 2.11). Рассматривая вариант технологии с разрезанием стержня в качестве основного именно по отношению к нему будем оценивать пиковые значения динамических напряжений в соответствии с (2.42).

В целях сравнительного анализа методов рассмотрим применение рассматриваемых трех подходов к решению модельной задачи – описанной ранее в подразделе 2.3 пространственной стержневой конструкции. Модельная конструкция нагружена четырьмя вертикальными силами F = 35 H, приложенными к стойкам верхнего яруса (рисунок 2.12). Величины сил подобраны таким образом, чтобы 1) исключить возможность физической нелинейности (перехода конструкционного материала в упругопластическую стадию деформирования), 2) для неповрежденной, и, по крайней мере, для начальных шагов сценариев повреждения исключить возможность ность потери устойчивости.



Рисунок 2.11 – Взаимосвязь технологий моделирования разрушения стержней и анализа НДС конструкций



Рисунок 2.12 – Схема модельной задачи (размеры в мм): 2, 3, 4 – последовательность разрушения стержней

Рассматриваются два варианта сценария аварийного разрушения, отличающиеся первым разрушенным элементом и элементов, для которого определяются внутренние силовые факторы. В сценарии 1 первоначально разрушается раскос, предметом анализа являются напряжения в стойке; в сценарии 2 разрушается стойка, предметом анализа являются напряжения в раскосе.

Дальнейшая последовательность разрушения одинакова в обоих сценариях (рисунок 2.12). Таким образом, оба сценария первоначально предполагают четыре шага разрушения.

В результате анализа устойчивости определяются формы потери устойчивости и соответствующие им коэффициенты – множители к действующей нагрузке, вызывающие потерю устойчивости по соответствующей форме (выражение (2.22)). С инженерной точки зрения эти коэффициенты можно интерпретировать как запасы устойчивости: если коэффициент больше единицы – потери устойчивости нет, в противном случае констатируется потеря устойчивости. Для рассматриваемой конструкции в неповрежденном состоянии запас устойчивости составляет 9,62. Запасы устойчивости при разрушении по первому сценарию: шаг 1 – 7,65; шаг 2 – 7,73; шаг 3 – 1,54; шаг 4 – 1,62. Для второго сценария соответствующие значения таковы: шаг 1 – 6,19; шаг 2 – 5,36; шаг 3 – 2,15; шаг 4 – 0,95. Эти результаты означают, что при накоплении повреждений по первому сценарию потеря устойчивости не возникает ни на одном шаге разрушения, а по второму сценарию возможна потеря на четвертом шаге разрушения. Следовательно, второй сценарий ограничим тремя шагами разрушения.

В результате модального анализа конструкций в поврежденном состоянии установлено, что для учета колебания 90% массы во всех случаях достаточно шесть собственных форм. Соответствующие диапазоны собственных частот составляют для первого сценария: шаг 1 – 86-262 Гц; шаг 2 – 86-262 Гц; шаг 3 – 86-213 Гц; шаг 4 – 79-86 Гц; для второго сценария: шаг 1 – 192-262 Гц; шаг 2 – 69-220 Гц; шаг 3 – 69-220 Гц.

Интервал возможных значений логарифмического декремента колебаний принят 0,05-0,15. При этом исходили из литературных данных для следующих классов конструкций, которые можно рассматривать в качестве аналогов: стальные конструкции, стальные строительные конструкции сварные, несущие конструкции портальных кранов, металлические конструкции козловых кранов. Подставив эти значения в выражение (2.38), получим значения коэффициента затухания в интервале 0,008-0,024. Значения коэффициентов рэлеевской модели демпфирования, определенные в соответствии с (2.37), сведены в таблицу 2.1.

Моделирование сценария – последовательного разрушения структурных элементов – осуществляется прямым неявным интегрированием уравнений движения с использованием технологии РСЭ. При этом характеристики демпфирования входят в начальные условия задачи и не могут меняться в процессе ее решения. В связи с этим выполним усреднение коэффициентов рэлеевской модели демпфирования: при анализе первого сценария для  $\delta_{mod} = 0,05$  коэффициенты составляют  $\alpha = 5,83$ ,  $\beta = 9,5 \cdot 10^{-6}$ , для  $\delta_{mod} = 0,15 - \alpha = 16,09$ ,  $\beta = 29,0 \cdot 10^{-6}$ ; для второго сценария соответственно для  $\delta_{mod} = 0,05 - \alpha = 7,23$ ,  $\beta = 7,8 \cdot 10^{-6}$ , для  $\delta_{mod} = 0,15 - \alpha = 21,69$ ,  $\beta = 23,0 \cdot 10^{-6}$ . Таким образом, в конечном итоге характеристики демпфирования получены путем интервального оценивания логарифмических декрементов колебаний конструкций-аналогов, и

последующего усреднения коэффициентов рэлеевской модели демпфирования с учетом изменения собственных частот в связи со степенью поврежденности конструкции. Это обусловлено степенью информационной обеспеченности анализа и возможностями применяемой CAEсистемы.

Поврежденное	$\xi = 0,008$		$\xi = 0,024$					
состояние	α	β	α	β				
Сценарий 1								
Шаг 1	6,51	7,3·10 <sup>-6</sup>	19,52	$22,0.10^{-6}$				
Шаг 2	6,51	7,3·10 <sup>-6</sup>	19,52	$22,0.10^{-6}$				
Шаг З	6,16	8,5·10 <sup>-6</sup>	18,47	$26,0.10^{-6}$				
Шаг 4	4,14	$15,0.10^{-6}$	6,85	46,0·10 <sup>-6</sup>				
Сценарий 2								
Шаг 1	11,13	5,6·10 <sup>-6</sup>	33,40	17,0·10 <sup>-6</sup>				
Шаг 2	5,28	8,8.10-6	15,83	26,0.10-6				
Шаг З	5,28	8,8·10 <sup>-6</sup>	15,83	$26,0.10^{-6}$				

Таблица 2.1 – Коэффициенты рэлеевской модели демпфирования поврежденной конструкции

За один период амплитуда колебаний уменьшится при логарифмическом декременте  $\delta_{mod}$ = 0,05 в  $e^{0.05}$  = 1,05 раза, при  $\delta_{mod}$  = 0,15 – в  $e^{0.15}$  = 1,16 раза. Приняв в качестве критерия затухания переходного процесса уменьшение его амплитуды в 100 раз, получим соответствующее число периодов: для  $\delta_{mod}$  = 0,05 необходимо 100/1,05 = 95 периодов, для  $\delta_{mod}$  = 0,15 – 100/1,16 = 86 периодов колебаний. Тогда, умножив полученные значения на период низшей формы (разделив на низшую частоту), получим следующие минимальные временные промежутки затухания переходных процессов. Для первого сценария при  $\delta_{mod}$  = 0,05: шаги 1-3 – 95/86  $\approx$  1,1 с, шаг 4 – 95/79  $\approx$  1,2 с; при  $\delta_{mod}$  = 0,05: шаги 1-3 – 86/86  $\approx$  1,1 с, шаг 4 – 8/79  $\approx$  1,4 с, при  $\delta_{mod}$  = 0,15: шаг 1 – 86/192  $\approx$  0,5 с, шаги 2, 3 – 86/69  $\approx$  1,3 с. Моменты выполнения команды, реализующей технологию РСЭ, согласованы с полученными временными промежутками затухания в предположении независимости событий разрушения каждого структурного элемента.

Статические и динамические оценки НДС получены в геометрически нелинейной постановке в среде программного обеспечения ANSYS Workbench (модули Static Structural и Transient Structural). Динамический анализ выполнялся путем решения полной системы уравнений движения с использованием неявной схемы прямого интегрирования по времени, базирующейся на методе Ньюмарка. Деформированное состояние конструкции после окончания переходных процессов характеризуются максимальными перемещениями порядка 15,1 мм (рисунок 2.13, а) при реализации первого сценария и 0,12 мм при реализации второго сценария (рисунок 2.13, б) (масштабы деформаций на рисунке различны и выбраны для обеспечения наглядности визуализации).



Рисунок 2.13 – Деформированное состояние поврежденной конструкции при первом (а) и втором (б) сценариях разрушения

Основной расчетной характеристикой являются напряжения по Мизесу (эквивалентные напряжения по четвертой теории прочности – теории удельной потенциальной энергии формоизменения). Пример соотношения расчетных оценок напряжений по результатам статического анализа НДС  $\sigma^{c}_{pac4}$  (первый подход), статического анализа НДС с упрощенным учетом импульсных эффектов  $\sigma^{d}_{n-1}$  (второй подход), и анализа переходных процессов  $\sigma^{d}_{(T)}$  (третий подход) показан на рисунке 2.14.



Рисунок 2.14 – Расчетные оценки напряжений в стойке при реализации сценария 1 (а) и раскосе при реализации сценария 2 (б) на третьем шаге разрушения:  $1 - \sigma^{c}_{pacy}$ ;  $2 - \sigma^{d}_{n-1}$ ;  $3 - \sigma^{d}_{(T)}(t)$  при  $\delta_{mod} = 0.05$ ;  $4 - \sigma^{d}_{(T)}(t)$  при  $\delta_{mod} = 0.15$ 

При численном анализе переходных процессов (третий подход) напряжения  $\sigma^{d}_{(T)}$  являются функциями времени  $\sigma^{d}_{(T)}(t)$ . С учетом переменного характера напряжений будем их характеризовать максимальным значением max { $\sigma^{d}_{(T)}(t)$ } на интервале времени, начинающемся незадолго до момента разрушения стержневого элемента, и заканчивающемся при затухании вызванного им переходного процесса. В таблицу 2.2 сведены результаты оценок с использованием трех рассматриваемых подходов, а также результаты статического анализа с моделированием разрушенных стержней удалением и применением технологии РСЭ.

	Состояние конструкции								
Вариант оценки напряжений	Неповре-	Шаг разрушения							
	жденная	1	2	3	4				
Сценарий 1, напряжения в стойке, МПа									
Удаление	10,0	14,6	18,0	18,4	18,4				
Технология РСЭ		12,0	12,1	14,1	20,1				
Разрезание, $\sigma^{c}_{pacy}$		12,0	12,1	14,1	39,0				
$\sigma^{d}_{n-1}$	-	14,0	12,1	16,0	63,9				
$\max\{\sigma^{d}_{(\mathrm{T})}(t)\}(\delta_{\mathrm{mod}}=0,05)$	-	13,8	13,3	24,8	65,9				
$\max\{\sigma^{d}_{(\mathrm{T})}(t)\}(\delta_{\mathrm{mod}}=0,15)$	-	13,2	13,2	23,8	68,0				
Сценарий 2, напряжения в раскосе, МПа									
Удаление	4,2	3,1	3,0	8,2	—				
Технология РСЭ		9,8	2,4	5,0	—				
Разрезание, $\sigma^{c}_{pacy}$		1,5	1,5	6,5	_				
$\sigma^{d}_{n-1}$	-	1,2	1,4	11,5	_				
$\max\{\sigma^{d}_{(\mathrm{T})}(t)\}(\delta_{\mathrm{mod}}=0,05)$	_	13,5	11,5	23,8	_				
$\max\{\sigma^d_{(\mathrm{T})}(t)\}(\delta_{\mathrm{mod}}=0,15)$	_	12,9	9,4	20,8	_				

Таблица 2.2 – Напряжения в элементах конструкции при последовательном разрушении стержней

Ожидаемо, результаты статического анализа (первый подход) оказываются всегда ниже результатов, учитывающих динамические эффекты деформирования (второй и третий подходы). Соответственно, результаты статического анализа НДС с упрощенным учетом импульсных эффектов при мгновенном выключении связей (второй подход) оказываются почти всегда ниже результатов анализа переходных процессов (третий подход). Однако систематических закономерностей в количественной разнице результатов, полученных с использованием разных подходов, по результатам рассматриваемой модельной задачи (таблица 2.2) не наблюдается. В некоторых случаях все три подхода дают весьма близкие оценки напряжений (сценарий 1, шаги 1, 2), в других практически совпадают результаты применения второго и третьего подходов (сценарий 1, шаг 4), но возможны и существенные различия результатов третьего и первых двух подходов (сценарий 2). Результаты, полученные для разных степеней демпфирования ( $\delta_{mod} = 0,05$  и  $\delta_{mod} = 0,15$ ), отличаются на 3-22% (в зависимости от сценария и шага разрушения).

Отдельно следует подчеркнуть существенные отличия результатов решения задачи в статической постановке: удаление, разрезание стержня и использование технологии РСЭ приводит к существенно отличающимся результатам.

#### 2.5 Результаты и выводы по разделу 2

Развитие последовательности локальных повреждений сопровождается перераспределением силовых потоков и изменением характера взаимодействия структурных элементов конструкции. Это предполагает достаточно сложную логику алгоритмов анализа поведения повреждаемых конструкций. Эти алгоритмы в значительной степени могут быть сконструированы (собраны) из готовых («стандартных») логико-вычислительных модулей и инструментов моделирования физико-технических эффектов, возникающих в повреждаемых конструкциях. Во втором разделе обоснован перечень таких модулей и инструментов для создания сложных, логически разветвленных алгоритмов анализа деформирования повреждаемых конструкций, включающий базовую вычислительную модель статического упругого анализа, учет геометрической нелинейности и упругопластического деформирования, резкого снижения жесткости повреждаемых элементов (процедура «рождение и смерть элементов»), решения задач контактного взаимодействия и потери устойчивости.

Показано, что при модальном анализе в целях исследования динамических свойств поврежденных стержневых конструкций необходимо использование технологий виртуального разрезания разрушенного структурного элемента путем модификации геометрической модели конструкции: как удаление его из расчетной схемы (модели), так и уменьшение жесткости в разрушенном сечении могут привести к существенным искажениям собственных частот и форм свободных колебаний.

В целях исследования структурной живучести разработана и апробирована инженерная методика анализа напряженно-деформированного состояния повреждаемых стержневых конструкций, основанная на совместном использовании

сценариев последовательного разрушения структурных элементов;

численных оценок собственных частот конструкций в поврежденных состояниях;

технологии «рождение и смерть элементов» для моделирования последовательного разрушения структурных элементов;

интервальных оценок характеристик демпфирования конструкций-аналогов;

численного анализа переходных процессов путем прямого неявного интегрирования полных уравнений динамики.

#### 3 Оценка структурной живучести повреждаемых стержневых конструкций

#### 3.1 Методический подход к оценке структурной живучести

С учетом рассмотренных в разделе 1.2 смысловых оттенков понятия «живучесть» под структурной живучестью стержневых конструкций будем понимать их свойство сохранять ограниченную работоспособность при наличии повреждений определенного вида (разрушение структурных элементов и/или связей между ними), обеспечиваемое структурой (конструктивной схемой) и выражающееся в количественных показателях чувствительности той или иной функциональной характеристики к дефектам и повреждениям структуры.

Принципиальная новизна такой трактовки в следующем. Традиционно при анализе структурной живучести под снижением работоспособности понимают снижение несущей способности, выражаемое в терминах напряженного состояния и прочности. Такой подход обоснован и достаточен для несущих строительных конструкций. В предлагаемой трактовке снижение работоспособности рассматривается в связи с обширным набором функциональных характеристик технических объектов.

В качестве функциональной характеристики следует принимать величину, отражающую эффективность выполнения техническим объектом своего основного функционального предназначения. Так, например, для силовых конструкций (основное функциональное назначение – обеспечение прочности (неразрушимости)) функциональной характеристикой могут быть значения максимальных напряжений или минимальных фактических коэффициентов запаса. Для колебательных систем функциональная характеристика – спектр собственных частот свободных колебаний: вопросы прочности также важны, но они носят подчиненную, вспомогательную роль. Для прецизионных объектов на первое место выходят функциональные характеристики точности и формостабильности.

При исследовании структурной живучести будем искать ответ на вопрос: в какой степени уровень поврежденности структуры влияет на снижение работоспособности. В этом случае последовательность разрушения структуры (сценарий накопления повреждений) постулируется, а причинно-следственные связи между смежными (соседними) шагами разрушения не анализируются и не устанавливаются. Таким образом, основываемся на варианте III подхода к определению сценариев накопления повреждений (подраздел 1.3). В этом случае рассматриваем сценарии не как ситуации реальной последовательности разрушения структурных элементов, а как способов изучения вклада отдельных групп структурных элементов в формирование свойства живучести. Тогда методику оценки структурной живучести сформулируем в общем виде следующим образом:

1 анализ целевых функций конструкции и установление одной или нескольких функциональных характеристик, характеризующих ее эффективность и работоспособность;

2 анализ структуры и условий функционирования конструкции для обоснования возможных и вводимых в рассмотрение повреждений;

3 обоснование сценариев накопления (развития) повреждений;

4 формулировка показателей живучести, характеризующих чувствительность функциональных характеристик конструкции к степени ее поврежденности, определяемой сценариями накопления (развития) повреждений;

5 формулировка критериев живучести, определяющих условия, при которых живучесть может считаться обеспеченной, и при которых необеспеченной;

6 определение аналитической, численной, экспериментальной процедуры (методики) анализа живучести, основанной на комплексном учете показателей, критериев живучести, возможных видов и сценариев накопления повреждений.

В дальнейших подразделах настоящего раздела диссертации предлагаемая методика реализуются для стержневых конструкций трех типов функционального назначения.

## 3.2 Оценка структурной живучести пространственных силовых стержневых конструкций

Для пространственных силовых стержневых конструкций основное функциональное назначение – обеспечение несущей способности для безаварийного функционирования технических объектов. В связи с этим естественным является описание функциональных характеристик в терминах напряженного состояния и прочности.

В качестве функциональной характеристики пространственных силовых стержневых конструкций будем использовать эквивалентные (эффективные) напряжения σ<sub>e</sub> и фактический коэффициент запаса [67<sup>6</sup>]. С учетом отраслевых особенностей эквивалентные напряжения для машиностроительных конструкций определяются как

$$\sigma_e = \sqrt{(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2 + 3 \cdot (\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2)},$$

<sup>&</sup>lt;sup>6</sup> В публикации [67] личный вклад соискателя заключается в исследовании напряженного состояния и обосновании расчетных случаев нагружения каркаса телекоммуникационного контейнера и составляет 40 % от объема всей публикации.

а для стержневых элементов строительных конструкций определяются эффективные напряжения

$$\sigma_e = \frac{N}{A_n} \pm \frac{M_x}{J_{xn}} h_y \pm \frac{M_y}{J_{yn}} h_x,$$

где  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$ ,  $\sigma_z$  – нормальные напряжения вдоль соответствующих координатных осей *x*, *y*, *z*;  $\tau_{xy}$  – касательное напряжение, действующее на площадке, перпендикулярной оси *x* и направленное вдоль оси *y*;  $\tau_{yz}$  – касательное напряжение, действующее на площадке, перпендикулярной оси *y* и направленное вдоль оси *z*;  $\tau_{zx}$  – касательное напряжение, действующее на площадке, перпендикулярной оси *z* и направленное вдоль оси *x*;  $A_n$  – площадь сечения нетто элемента конструкции;  $J_{xn}$ ,  $J_{yn}$  – моменты инерции сечения относительно осей;  $h_x$ ,  $h_y$  – координаты рассматриваемой точки сечения относительно осей.

Рассматривая в качестве критерия работоспособности предел текучести, получим коэффициенты запаса соответственно для машиностроительных и строительных конструкций в виде

$$n = \sigma_{T}(\sigma_{0,2}) / \sqrt{(\sigma_{x} - \sigma_{y})^{2} + (\sigma_{y} - \sigma_{z})^{2} + (\sigma_{z} - \sigma_{x})^{2} + 3 \cdot (\tau_{xy}^{2} + \tau_{yz}^{2} + \tau_{zx}^{2})},$$

$$n = \frac{R_{y}\gamma_{c}}{\frac{N}{A_{n}} \pm \frac{M_{x}}{J_{xn}}h_{y} \pm \frac{M_{y}}{J_{yn}}h_{x}} = \frac{R_{y}\gamma_{c}}{\sigma_{e}}.$$
(3.1)

где  $R_y$  – расчетное сопротивление стали растяжению, сжатию, изгибу по пределу текучести;  $\gamma_c$  – коэффициент условий работы.

Приняв в соответствии с результатами раздела 2.4 в качестве расчетных эквивалентных (эффективных) напряжений максимальные значения, полученные в результате анализа переходных процессов

$$\sigma_e = \max\left\{\sigma_{\rm T}^d(t)\right\},\tag{3.2}$$

фактический коэффициент запаса (3.1) запишем в виде

$$n = \frac{\sigma_T(\sigma_{0,2})}{\max\left\{\sigma_T^d(t)\right\}}, \qquad n = \frac{R_y \gamma_c}{\max\left\{\sigma_T^d(t)\right\}}.$$
(3.3)

Критерии, показатели и технологии оценки структурной живучести пространственных стержневых силовых конструкций несколько отличаются в зависимости от глубины сценария накопления повреждений. Последняя может измеряться как в непрерывных единицах (преимущественно временем развития повреждений), так и дискретно (количеством шагов (событий) повреждения (разрушения) отдельных структурных элементов.

При рассмотрении разрушения единственного структурного элемента (принцип единичного отказа) абсолютные  $S^a$  и относительные  $S^r$  показатели живучести сформулируем в терминах напряженного состояния и прочности в соответствии с (3.2), (3.3) следующим образом

$$S^{a} = \sigma_{e} = \max\left\{\sigma_{\mathrm{T}}^{d}(t)\right\}_{\mathrm{I}},\tag{3.4}$$

$$S^{r} = n = \frac{\sigma_{T}(\sigma_{0,2})}{\max\left\{\sigma_{T}^{d}(t)\right\}_{1}}, \qquad S^{r} = n = \frac{R_{y}\gamma_{c}}{\max\left\{\sigma_{T}^{d}(t)\right\}_{1}}, \qquad (3.5)$$

где  $\max \left\{ \sigma_{\rm T}^{d}(t) \right\}_{\rm I}$  – максимальные напряжения в течение переходных процессов, вызванного разрушением (удалением из расчетной схемы) единственного структурного элемента.

В этом случае критерии живучести естественно записать в виде условий прочности

$$S^a < \sigma_T(\sigma_{0,2}), \qquad \qquad S^a < R_v \gamma_c, \qquad (3.6)$$

$$S^r > 1. (3.7)$$

Основание рассматривать условия прочности в качестве критериев живучести заключается в наличии повреждений и разрушений: принято считать, что, если конструкция претерпевает разрушения и имеет повреждения, то она заведомо непрочна. Следовательно, при наличии локальных разрушений и повреждений неправомерно говорить о прочности, а необходимо говорить о живучести, интерпретируя ее с позиций прочности.

При последовательном разрушении структурных элементов (реализации сценария накопления повреждений) критерии живучести используются в виде (3.6), (3.7), а показатели живучести (3.4), (3.5) определяются последовательно на каждом *i*-м шаге разрушения в диапазоне выполнимости критериев живучести

$$S_i^a = \max\left\{ \sigma_{\mathrm{T}}^d(t) \right\}_i \left| S_i^a < \sigma_{\mathrm{T}}(\sigma_{0,2}), \qquad S_i^a = \max\left\{ \sigma_{\mathrm{T}}^d(t) \right\}_i \left| S_i^a < R_y \gamma_c \right\}_i$$
$$S_i^r = \frac{\sigma_{\mathrm{T}}(\sigma_{0,2})}{\max\left\{ \sigma_{\mathrm{T}}^d(t) \right\}_i} \left| S_i^r > 1, \qquad S_i^r = \frac{R_y \gamma_c}{\max\left\{ \sigma_{\mathrm{T}}^d(t) \right\}_i} \left| S_i^r > 1. \right\}$$

Важным и неоднозначным является вопрос выбора (обоснования) сценариев последовательного разрушения сложной структуры. В силу структурной избыточности (высокого уровня статической неопределимости) при разрушении (удалении из расчетной

схемы) отдельных элементов максимальные напряжения в оставшихся стержнях могут увеличиться незначительно или даже уменьшиться. Выполненные автором [33<sup>2</sup>, 34<sup>7</sup>] исследования НДС повреждаемых стержневых конструкций свидетельствуют, что аналогичные результаты получаются для большинства реальных пространственных стержневых конструкций в силу их структурной избыточности, обусловленной в частности, высоким уровнем статической неопределимости.

В этом случае важнейшим фактором, обусловливающим сценарий разрушения, является распределение по элементам конструкции технологической и эксплуатационной дефектности (пор, непроваров, трещин и т.п.). Показано, что при введении в трехмерные модели [32<sup>8</sup>, 68<sup>5</sup>] структурных элементов стержневых конструкций дефектов сплошности [31<sup>9</sup>] может наблюдаться существенное перераспределение силовых факторов между элементами, что в статически неопределимых системах обусловлено изменением распределения жесткости вследствие наличия дефекта.

С учетом этого предлагается определение сценария разрушения экспертомисследователем исходя из анализа НДС и предположения о распределении дефектов сплошности в структурных элементах конструкции. При априори равномерном распределении дефектов сплошности наиболее вероятно разрушение в наиболее нагруженном элементе. Это дает основание определять сценарий путем выбора и удаления из расчетной схемы на каждом этапе нагружения наиболее нагруженного структурного элемента, несмотря на то, что значения расчетных (без учета наличия дефектов) напряжений могут не превышать предельных значений.

Еще один важный вопрос заключается в определении глубины сценария, т.е. количества последовательных шагов разрушения, в течение которых конструкция сохраняет ограниченную несущую способность. Для обоснования сценария предлагается следующий апробированный подход.

Выполняется серия статических расчетов НДС с последовательным удалением из расчетной схемы на каждом шаге разрушения наиболее нагруженного структурного элемента. Расчеты выполняются в геометрически линейной и геометрически нелинейной постановках. Сравнение результатов линейного и нелинейного анализов осуществляется в предположении, что резкое их отличие на определенном шаге разрушения свидетельствует о скачкообразном

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup> В публикации [33] результаты полученные соискателем лично, составляют 100 % от объема всей публикации.

<sup>&</sup>lt;sup>7</sup> В публикации [34] результаты полученные соискателем лично, составляют 100 % от объема всей публикации.

<sup>&</sup>lt;sup>8</sup> В публикации [32] результаты полученные соискателем лично, составляют 100 % от объема всей публикации.

<sup>&</sup>lt;sup>5</sup> В публикации [68] личный вклад соискателя заключается в построении моделей структур стержневых систем и составляет 60 % от объема всей публикации.

<sup>&</sup>lt;sup>9</sup> В публикации [31] личный вклад соискателя заключается в апробации алгоритма анализа влияния повреждения элемента стержневой системы на особенности ее деформирования и составляет 70% от объема всей работы.

уменьшении несущей способности (развитии больших деформаций). О полной потери несущей способности свидетельствует отсутствие сходимости нелинейной задачи (решения не существует). Основанием для последнего утверждения являются следующие соображения.

Сходимости решения нелиней задачи может не быть из-за того, что

задача не имеет решения;

начальное приближение слишком далеко от решения;

задача негладкая и недифференцируема.

При численном анализе одной и той же конечно-элементной модели с последовательным удалением элементов из указанных трех причин первая (отсутствие решения) является наиболее вероятной. Если использование доступных в рамках вычислительного пакета приемов по улучшению сходимости (измельчение сетки конечных элементов, уменьшение шага интегрирования) не приводит к положительному результату, то практически можно судить об отсутствии решения. В этом можно убедиться путем увеличения приемлемого уровня погрешности (различия в результатах последнего (считающегося сошедшимся) и предыдущего решений в ходе итерационного процесса решения нелинейной задачи): отсутствие сходимости даже при очень больших значениях погрешности (скажем, до 50 %) подтверждает отсутствие решения. Это предположение подтверждается визуализацией и анализом физичности результатов.

В случае последовательного разрушения структурных элементов предлагается показатель живучести, характеризующий глубину сценария накопления повреждений – количество шагов разрушения до нарушения критериев живучести:

$$k = i_{\max} \left| \left( \exists_{sol} \in SOL \begin{pmatrix} S_i^a < \sigma_T(\sigma_{0,2}); S_i^r > 1 \\ S_i^a < R_y \gamma_c; S_i^r > 1 \end{pmatrix} \right|.$$

Понимать последнее выражение следует следующим образом. Количество шагов разрушения до нарушения критериев живучести соответствует количеству *sol* из множества *SOL* решений, таких, для которых выполняются критерии живучести. Таким образом, значение *k* соответствует последнему номеру шага разрушения, на котором выполняются критерии живучести (если такое решение удается найти), или последнему номеру шага разрушения, для которого удается получить сходящееся численное решение при решении задачи в геометрически нелинейной постановке.

Рассмотрим применение предлагаемого подхода к оценке живучести типовых пространственных стержневых силовых конструкций – металлоконструкций каркаса телекоммуникационного контейнера и телекоммуникационной вышки, предназначенных для размещения технологического оборудования радиотелевизионных передающих станций сети цифрового телевещания.

Рассматриваемые конструкции предназначены для эксплуатации в экстремальных условиях, включающих в себя диапазон ветровых нагрузок до VII ветрового района, снеговых нагрузок и сейсмичности до 9 баллов (рисунок 3.1). Нагружение осуществляется квазистатическими аналогами указанных нагрузок в соответствии с СП 20.13330.2016 [160].

Каркас представляет собой металлоконструкцию, состоящую из балочных несущих элементов с варьируемыми формами и размерами поперечного сечения. Конструкция контейнера – каркасная, цельносварная, состоящая из несущих и ограждающих элементов, стены, потолок и пол выполнены из сэндвич-панелей. Габаритные размеры контейнера (каркаса) (Д×Ш×В) 4000×2360×2680 мм. Несущий каркас контейнера выполнен в виде цельносварной неразборной конструкции из стальных профилей (квадратная труба 50×3 мм), на полу используется восемь коротких поперечных балок (равнополочный уголок 50×4 мм), сталь 09Г2С. Стены контейнера укреплены металлическим листом толщиной 1,5-2,0 мм, выполняющим роль антивандальной защиты. Масса каркаса контейнера – 630 кг. Приемные параболические антенны диаметром 2,4 и 1,2 м массой соответственно 120 и 50 кг расположены на крыше контейнера и закреплены на закладных элементах непосредственно на каркасе.



*F*<sub>1</sub>, *F*<sub>3</sub>-*F*<sub>5</sub> – ветровая нагрузка на боковые (АБЕД, ГВЖЗ), торцевые (БВЖЕ, АГЗД) стены и кровлю крыши (ДЕИК, ИЖЗК); *F*<sub>2</sub> – расчетная нагрузка от сейсмического воздействия, приложенная в соответствии с балочной расчетной схемой колебаний конструкции; F<sub>6</sub>, F<sub>7</sub> – снеговая нагрузка на кровлю крыши

Рисунок 3.1 – Схема приложения нагрузок к каркасу телекоммуникационного контейнера

Для элементов конструкций из стали 09Г2С, используемой в качестве конструкционного материала для изготовления рассматриваемых объектов, в соответствии с ГОСТ 27772-2015 [52] предел текучести составляет  $R_{yn}$  = 345 МПа. Тогда расчетное сопротивление [159] составляет ляет
$$R_{v} = R_{vn} / \gamma_{m} = 345 / 1,025 = 337 \text{ MIIa},$$

где *ү<sub>m</sub>* – коэффициент надежности по материалу.

С учетом широкого диапазона предполагаемых условий эксплуатации сформулирован следующий перечень расчетных комбинаций нагрузок (количественные значения нагрузок определены в соответствии с нормативными требованиями [158, 160]): 1 – собственный вес; 2 – собственный вес и ветер; 3 – собственный вес и снег; 4 – собственный вес и сейсмические воздействия; 5 – собственный вес, ветер и снег; 6 – собственный вес, ветер и сейсмические воздействия; 7 – собственный вес, снег и сейсмические воздействия; 8 – собственный вес, снег, ветер и сейсмические воздействия; 8 – собственный вес, снег, ветер и сейсмические воздействия; 8 – собственный вес, снег, ветер и сейсмические воздействия; 8 – собственный вес, снег, ветер и сейсмические воздействия; 8 – собственный вес, снег, ветер и сейсмические воздействия; 8 – собственный вес, снег, ветер и сейсмические воздействия; 8 – собственный вес, снег, ветер и сейсмические воздействия; 8 – собственный вес, снег, ветер и сейсмические воздействия; 8 – собственный вес, снег, ветер и сейсмические воздействия; 8 – собственный вес, снег, ветер и сейсмические воздействия; 8 – собственный вес, снег, ветер и сейсмические воздействия; 8 – собственный вес, снег, ветер и сейсмические воздействия; 8 – собственный вес, снег, ветер и сейсмические воздействия.

С учетом рассматриваемой комбинации нагрузок и воздействий наиболее нагружающим предположительно является восьмой случай нагружения, для которого и предполагается получение оценок живучести. Для этих условий анализ живучести каркасов контейнеров выполнен на основании принципа единичного отказа (глубина сценария накопления повреждений – одно событие) [21<sup>10</sup>].

Конечно-элементная модель каркаса одной из модификаций контейнера, снабженной параболическими антеннами, показана на рисунке 3.2. В соответствии с принципом единичного отказа должны быть исследованы характеристики НДС в сечении переходного процесса при поочередном (независимом) разрушении отдельных структурных элементов. Перечень этих структурных элементов назначается исходя из анализа НДС неповрежденной конструкции, анализа топологии (структуры) пространственной силовой схемы конструкции и априорных представлений об опасности отказов.

Для каркаса контейнера рассмотрены следующие повреждения (рисунок 3.3):

1 – разрушение диагональной связи боковой стены;

2 – разрушение продольной балки крыши/каркаса;

3 – разрушение диагональной связи торцевой стены;

4 – разрушение поперечного элемента в зоне крепления параболической антенны диаметром 2,4 м;

5 – разрушение поперечного элемента в зоне крепления параболической антенны диаметром 1,2 м;

6 – разрушение продольного несущего элемента кровли.

Модальный анализ конструкции контейнера с учетом рассматриваемых повреждений показал, что в рассматриваемом диапазоне собственных частот свободных колебаний наиболь-

<sup>&</sup>lt;sup>10</sup> В публикации [21] личный вклад соискателя заключается в исследовании прочности и живучести несущих конструкций для оборудования цифрового телерадиовещания и спутниковой связи в экстремальных условиях эксплуатации, с учетом возможных повреждений и составляет 40 % от объема всей публикации.

шее значение не превышает 11 Гц. Следовательно, шаг интегрирования уравнений (2.24) принимаем не выше  $\Delta t = 1/(20.11) = 4,5.10^{-3}$  с.





Рисунок 3.2 – Конечно-элементная модель каркаса контейнера с параболическими антеннами

Рисунок 3.3 – Схема повреждений каркаса контейнера

На рисунках 3.4 – 3.9 показаны распределения максимальных напряжений во времени и распределение времени, в которое возникают максимальные напряжения в течение переходного процесса.

Так, например, при разрушении структурного элемента 1 максимум напряжений в течение всего переходного периода составляет порядка 196 МПа (рисунок 3.4, а), а возникает этот максимум в момент времени 3,4 с (рисунок 3.4, б).



Рисунок 3.4 – Распределение максимумов эффективных напряжений в течение переходного процесса (а) и времени возникновения максимумов (б) при повреждении №1 согласно рисунку 3.3



в течение переходного процесса (а) и времени возникновения максимумов (б)

при повреждении №2 согласно рисунку 3.3



в течение переходного процесса (а) и времени возникновения максимумов (б) при повреждении №3 согласно рисунку 3.3

75



Рисунок 3.7 – Распределение максимумов эффективных напряжений в течение переходного процесса (а) и времени возникновения максимумов (б) при повреждении №4 согласно рисунку 3.3



при повреждении №5 согласно рисунку 3.3



в течение переходного процесса (а) и времени возникновения максимумов (б) при повреждении №6 согласно рисунку 3.3

Абсолютные (3.4) и относительные (3.5) показатели живучести при разрушении структурных элементов каркаса контейнера показаны в таблице 3.1.

Повреждение	$S^a$ , M $\Pi$ a	$S^r$
1	196	1,7
2	194	1,7
3	194	1,7
4	186	1,7
5	194	1,8
6	194	1,7

Таблица 3.1 – Показатели живучести каркаса контейнера

Из полученных результатов следует, что все рассматриваемые повреждения не приводят к опасным значениям максимумов напряжений за счет структурной избыточности конструкции и ее способности к перераспределению силовых потоков. Живучесть конструкции на рассматриваемом множестве повреждений обеспечена, поскольку ни одно из рассматриваемых единичных повреждений не приводит к инициации последовательного разрушения структуры.

Предлагаемую технологию анализа структурной живучести пространственной силовой стержневой конструкции с учетом сценария последовательного разрушения рассмотрим на примере металлоконструкции телекоммуникационной мачты. Она представляет собой решетчатую трехгранную призму – равносторонний треугольник со стороной 1000 мм, состоящую из секций. Стык поясов секций осуществлен через фланцы болтовым соединением. Общая высота

мачты 12 м с количеством секций 4, высота одной секции – 3 м. Материал – сталь 09Г2С. Структурные элементы мачты представлены трубами диаметром 57 мм и толщиной стенки 5 мм, диаметром 32 мм и толщиной стенки 4 мм, равнополочным уголком в основании секции 45×5 мм. Масса мачты – 497 кг.

Мачта связана с каркасом контейнера двумя раскосами и нагружена комплексом экстремальных нагрузок, включающих собственный вес, ветровые нагрузки VII ветрового района и инерционные нагрузки от сейсмического воздействия интенсивностью 9 баллов. Весовые и ветровые нагрузки распределены по всем узлам конечно-элементной модели, а инерционные нагрузки от сейсмического воздействия в соответствии балочной расчетной схемой консольного типа [158, 160] сосредоточены в узлах верхней части модели (рисунок 3.10).



Рисунок 3.10 – Расчетная схема мачты высотой 12 м

Для мачты, показанной на рисунке 3.10, предварительно исходя из анализа НДС определен сценарий, состоящий из 11 шагов разрушения. Отличия в результатах линейного и нелинейного анализа максимальных поступательных перемещений деформированной конструкции (таблица 3.2) показывают их фактическое совпадение вплоть до девятого шага включительно. На десятом и одинадцатом шагах линейный расчет показывает катастрофический рост перемещений, а нелинейный расчет завершить не удается из-за отсутствия сходимости численного решения.

	Максимальные перемещения, мм		
шаг разрушения	Линейный расчет	Нелинейный расчет	
0 (без повреждений)	3,08	3,07	
1	3,80	3,79	
2	6,12	6,09	
3	7,72	7,72	
4	9,38	9,39	
5	10,01	10,02	
6	11,92	11,92	
7	14,36	14,37	
8	18,28	18,28	
9	19,34	19,28	
10	274,02	-	
11	1941,60	-	

Таблица 3.2 – Максимальные перемещения поврежденной мачты

На рисунке 3.11 показано деформированное состояние мачты на девятом, десятом и одинадцатом шагах разрушения по результатам линейного анализа. Очевидна нефизичность результатов и фактическая потеря конструкционной целостности на десятом и одинадцатом шагах, для которых не удается получить решение в геометрически нелинейной постановке.

С учетом выполненного анализа ограничимся девятью шагами разрушения (рисунок 3.12), обеспечивающими физичность результатов и сходимость нелинейного расчета. Именно для этого сценария далее выполняется исследование переходных процессов  $\sigma^{d}_{(T)}(t)$ .



Рисунок 3.11 – Деформированное состояние мачты на девятом (а), десятом (б) и одинадцатом (в) шагах разрушения по результатам геометрически линейного анализа

В результате модального анализа поврежденной мачты получены расчетные значения собственных частот свободных колебаний (таблица 3.3). Из таблицы 3.3 следует, что максимальное значение собственной частоты повреждаемой мачты составляет 19,112 Гц. Отсюда минимальный период колебаний составляет 1/19,112 Гц = 0,0523 с, и максимальный шаг интегрирования уравнений динамики составляет 0,0523/20 = 0,0026 с.

III or noon way ou u	Мода колебаний					
шаг разрушения	1	2	3	4	5	6
0 (без повреждений)	10,657	10,713	16,641	17,707	19,119	19,346
1	10,559	10,647	15,525	15,654	19,038	19,106
2	9,494	10,24	11,791	15,331	18,984	19,112
3	7,8044	9,8706	10,481	15,254	16,056	19,025
4	7,8019	8,8661	10,21	14,472	15,998	18,863
5	7,8025	8,6138	10,201	14,378	15,987	18,885
6	7,7655	8,1278	10,174	12,514	15,949	18,78
7	7,3737	7,7873	10,172	12,505	15,932	18,744
8	6,6577	7,7562	10,088	10,338	15,921	17,952
9	2,9021	6,5834	7,9793	10,17	15,93	17,924

Таблица 3.3 – Собственные частоты колебаний, Гц



Рисунок 3.12 – Сценарий разрушения телекоммуникационной мачты: *А*, *В*, … *I* – конечные элементы, к которым последовательно применяется технология «рождение и смерть элементов»

В результате численного анализа переходных процессов получены расчетные значения эффективных напряжений  $\sigma^{d}_{(T)}(t)$  (рисунки 3.13 – 3.22).



Рисунок 3.13 – Переходные процессы изменения максимальных напряжений в мачте при реализации сценария повреждения в соответствии с рисунком 3.12: 1-9 моменты времени разрушения отдельных стержней



Рисунок 3.14 – Переходный процесс изменения максимальных напряжений на первом шаге





Рисунок 3.15 – Переходный процесс изменения максимальных напряжений на втором шаге повреждения мачты



Рисунок 3.16 - Переходный процесс изменения максимальных напряжений на третьем шаге

повреждения мачты





повреждения мачты



Рисунок 3.18 – Переходный процесс изменения максимальных напряжений на пятом шаге по-





повреждения максимальных напряжении на шестом



Рисунок 3.20 - Переходный процесс изменения максимальных напряжений на седьмом шаге

повреждения мачты



Рисунок 3.21 – Переходный процесс изменения максимальных напряжений на восьмом шаге

повреждения мачты





С учетом полученных оценок максимальных напряжений определены следующие значения показателей живучести (таблица 3.4).

Повреждение	$S^a$ , M $\Pi$ a	$S^{r}$
1	92	3,7
2	136	2,5
3	96	3,5
4	103	3,3
5	63	5,3
6	87	3,9
7	110	3,1
8	131	2,6
9	161	2,1

Таблица 3.4 – Показатели живучести телекоммуникационной мачты

Как видно из полученных результатов, критерии живучести выполняются на всех рассмотренных шагах сценария. Следовательно, для данного объекта в качестве основного показателя живучести необходимо рассматривать величину k = 9: живучесть мачты обеспечена на девяти последовательных шагах разрушения.

### 3.3 Оценка структурной живучести колебательных систем стержневого типа

Рассмотрение технических объектов как колебательных систем позволяет абстрагироваться от второстепенных конструктивных особенностей и изучать динамические свойства (собственные формы и частоты колебаний) в связи с распределением массовых и жесткостных характеристик. Очевидная связь между динамическими свойствами, массовыми и жесткостными характеристиками выражается уравнением в матричном виде

$$\left( \begin{bmatrix} K \end{bmatrix} - \lambda_{\text{mod}} \begin{bmatrix} M \end{bmatrix} \right) x_{ve} = 0, \tag{3.8}$$

где [K] – глобальная матрица жесткости; [M] – глобальная матрица масс;  $\lambda_{mod} = \omega^2$ ;  $\omega$  – частота; *x<sub>ve</sub>* – вектор собственной формы. Эта связь послужила основой постановки и решения большого количества прикладных задач теории колебаний конструкций с дефектами и повреждениями различной природы [71, 191, 194, 197, 200-202, 204, 209, 212, 217-219, 221, 227, 228, 230-232, 235, 236, 242]. Дефекты и повреждения всегда приводят к локальному изменению (обычно, уменьшению) жесткости (изменению в уравнении (3.8) компонент матрицы [*K*]), а иногда (в случае удаления поврежденных элементов из конструкции) – и к изменению массы (изменению в уравнении (3.8) компонент матрицы [*M*]). Прямые задачи заключаются в изучении влияния дефектов и повреждений на динамические свойства конструкций, обратные – в определении локализации и размеров дефектов и повреждений по наблюдаемым собственным формам и частотам колебаний.

Большинство выполняемых в этой предметной области исследований посвящено исследованию динамических характеристик повреждаемых балок [191, 202, 209, 212, 218, 221, 228, 230, 236]. Это объясняется как низкой размерностью решаемых задач, так и наглядностью описания форм колебаний в виде графика перемещений вдоль оси балки. В некоторых случаях исследования распространяются на двумерные [201] и трехмерные [66, 71, 242] объекты. Решения могут быть получены аналитическими, численными, экспериментальными методами, а также их комбинацией.

В качестве дефекта в большинстве случаев рассматривается трещина [209, 202, 212, 217, 218, 221, 228, 230, 236], однако могут рассматриваться и коррозионные повреждения [231, 235], а также повреждения любой природы, моделируемые удалением конструктивного элемента или его части из расчетной схемы [242, 66]. Основным результатом решения таких задач являются зависимости собственных частот, форм и коэффициентов демпфирования колебаний от уровня поврежденности (локализации и размера дефекта).

Развитие идеи о взаимосвязи дефектов, повреждений и динамических свойств конструкций привело к включению этой взаимосвязи в постановки задач оптимизации конструкций и прогнозирования остаточного ресурса [200, 219]. В настоящей работе рассматриваются возможная постановка и решение задачи анализа живучести конструкции на основе численного исследования влияния повреждений на динамические свойства колебательной системы, содержащей в своем составе силовые конструкции стержневого типа.

Применительно к колебательным системам наиболее близкой к приведенной в начале настоящего раздела трактовке понятия живучести оказывается рассматриваемая в [201] чувствительность параметра  $\lambda_{mod}$  в уравнении (3.8) к изменению матрицы жесткости в связи с наличием повреждения:

$$\delta\lambda_{\rm mod} = \frac{x^T \delta[K] x}{x^T [M] x}$$

Тогда задача заключается в

– конкретизации понятия «живучесть» для колебательных систем, имеющих в своем составе конструкции стержневого типа;

- формулировке возможного варианта критерия живучести;

- разработке и апробации методики количественного анализа живучести.

Во многих технических приложениях в качестве условия работоспособности формулируется требование превышения низшей собственной частотой колебаний  $f_1$  некоторого заранее заданного критического значения  $f^*$ . Разновидность такого требования – обеспечение несовпадения собственных частот  $f_i$  с набором заранее заданных критических значений  $f_i^*$ . Эти значения, как правило, определяются частотами возможного возникновения возмущений. Требования направлены на исключение возможности возникновения резонансных явлений. Тогда под живучестью колебательной системы будем понимать ее способность при возникновении и накоплениии повреждений сохранять

 – собственные частоты в допустимом диапазоне и не допускать их совпадения с критическими значениями (приближения к критическим значениям);

 – скорость изменения собственных частот – чувствительность динамических характеристик к наличию повреждений.

В предположении возникновения повреждений в стержневых элементах колебательной системы количественные показатели живучести *S* предлагается определять в натуральных или относительных величинах следующим образом [64<sup>11</sup>]:

$$S^{a} = f_{1j} = h(d);$$
  $S^{a} = f_{ij} = h(d);$  (3.9)

$$S^{r} = f_{1j} / f_{10} = h(d); \qquad S^{r} = f_{ij} / f_{i0} = h(d); \qquad (3.10)$$

$$S^{\nu} = (f_{1j}/f_1)' = h(d); \qquad S^{\nu} = (f_{ij}/f_i)' = h(d), \qquad (3.11)$$

где  $f_{10}$ ,  $f_{i0}$  – собственные частоты колебаний неповрежденной конструкции;  $f_{1j}$ ,  $f_{ij}$  – собственные частоты колебаний при возникновении *j*-го дефекта (повреждения); i=1,m; m – количество регламентируемых (недопустимых) собственных частот; j=0,n; n – количество возможных повреждений, принимаемых в рассмотрение в соответствие с некоторым сценарием их возникнове-

<sup>&</sup>lt;sup>11</sup> В публикации [64] личный вклад соискателя заключается в исследовании влияния повреждений на поведение колебательных систем: перераспределении жесткостей и масс, в изменении собственных частот и форм колебаний и составляет 60 % от объема всей публикации.

ния и развития; h(d) - функции, определяемые расчетными или экспериментальными методами; d - степень поврежденности, носящая дискретный или непрерывный характер в зависимости от физико-технической природы повреждения:

$$d = \sum_{j=1}^{n} d_{j}; \qquad \qquad d = \int_{j=1}^{n} d_{j}.$$
(3.12)

Дискретная трактовка степени поврежденности применима при полной потере жесткости стержневого элемента при его разрушении или потере устойчивости. В этом случае он удаляется из расчетной модели с внесением соответствующих изменений в глобальные матрицы жесткости [K] и масс [M]. Непрерывная трактовка степени поврежденности возможна в случае постепенного снижения жесткости стержневого элемента вследствие, например, развития трещины в сечении элемента или его коррозии. Это отражается в корректировке глобальной матрицы жесткости K.

Показатели живучести (3.9)-(3.11) отражают изменения вследствие накопления повреждений:

- зависимости (3.9) - абсолютных значений собственных частот;

 – зависимости (3.10) – относительных значений собственных частот по сравнению с неповрежденной конструкцией;

- зависимости (3.11) - интенсивности изменения относительных показателей (3.10).

Количественные критерии живучести могут быть записаны в виде

$$S^{a} > f^{*}, \qquad S^{a} > f_{i}^{*}, \qquad (3.13)$$

$$S^{r} > (f_{1j}/f_{1})^{*}, \qquad S^{r} > (f_{ij}/f_{i})^{*}, \qquad (3.14)$$

$$S^{\nu} < (f_{1j}/f_1)^{*}, \qquad S^{\nu} < (f_{ij}/f_i)^{*}.$$
 (3.15)

Обоснование предельных значений  $f^*$ ,  $f_i^*$  в (3.13) и относительных величин ( $f_{1j}/f_1$ )<sup>\*</sup>, ( $f_{ij}/f_i$ )<sup>\*</sup> в (3.14) обычно не вызывает затруднений, поскольку они определяются возможными частотами возмущений и содержатся в технических требованиях к проектируемому объекту. Гораздо более сложным оказывается вопрос обоснования предельных значений интенсивности изменения относительных показателей в (3.15). Он требует специальных исследований. Однако в качестве предварительного основания о суждении о живучести объекта можно рассматривать точки (участки) перелома (резкого изменения) графиков зависимостей (3.9), (3.10) – они соответствуют резкому изменению величин  $S^{\nu}$  и свидетельствуют о значительном повышении чувствительности к повреждениям данной степени и, соответственно, о резком снижении свойства сохранять стабильными собственные частоты колебаний.

В качестве дополнительных качественных критериев живучести можно рассматривать отсутствие неприемлемых форм колебаний при возникновении повреждений, вытекающих из физико-технических особенностей системы.

Методика анализа живучести сформулирована в общем виде следующим образом:

 – определение (обоснование) возможных сценариев возникновения и накопления повреждений в стержневых элементах колебательной системы;

– расчетная или экспериментальная реализация сценария последовательного внесения n повреждений  $d_i$  в систему с фиксацией собственных частот колебаний  $f_{1i}, f_{ii}$ ;

– определение условий выполнения критериев живучести (3.13)-(3.15);

- вычисление количественных показателей живучести в соответствии с (3.9)-(3.11);

– разработка рекомендаций по обеспечению или повышению живучести.

Конкретизация этой методики осуществляется в связи с физико-технической природой и конструктивными особенностями колебательной системы. Рассмотрим далее отдельные аспекты применения методики к конкретной колебательной системе.

В качестве объекта анализа живучести рассмотрим металлокомпозитный бак высокого давления электрореактивных двигательных установок космических аппаратов, предназначенный для хранения рабочего тела (ксенона). Масса собственно бака составляет 30 кг, масса рабочего тела – 570 кг, масса бака с рабочим телом составляет 600 кг. Бак подвешивается с помощью системы преднатяженных композитных строп на силовой конструкции корпуса (СКК), представляющей собой цилиндрическую оболочку из углепластиковых стержней (рисунок 3.23). СКК жестко крепится в нижней ее части. Концы каждой группы из четырех строп крепятся в одном из двадцати четырех узлов крепления на силовой конструкции корпуса (рисунок 3.24).

Рассматриваемый объект при выводе космического аппарата на орбиту испытывает значительные нестационарные нагрузки. В связи с этим представляет интерес его поведение как колебательной системы, динамические свойства которой определяют ее работоспособность. Гипотетически возможное повреждение отдельных структурных элементов СКК, очевидно, приводит к локальному уменьшению жесткости и, как следствие, изменению динамических свойств колебательной системы. Целью анализа живучести рассматриваемого объекта является изучение влияния повреждения СКК, моделируемого путем удаления ее структурных элементов из расчетной схемы, на низшую собственную частоту колебаний.





Рисунок 3.23 – Общий вид объекта: 1 – бак; 2 – стропы; 3 – фрагмент силовой конструкции корпуса

Рисунок 3.24 – Схема крепления строп на силовой конструкции корпуса

Обоснование возможных сценариев возникновения и накопления повреждений в колебательной системе осуществляется следующим образом. Основная часть массы колебательной системы сосредоточена в баке 1, тогда как ее жесткость обеспечивается преимущественно структурой СКК 3 и жесткостью ее элементов. При динамическом нагружении инерционные силовые воздействия от бака посредством строп передаются на зоны их крепления на СКК. Следовательно, структурные элементы СКК в этих зонах являются наиболее нагруженными и могут быть повреждены. Это подтверждается механическими испытаниями несущей способности<sup>\*</sup> при повышенных горизонтальных силовых нагрузках на бак: при достижении 95% испытательных нагрузок повреждения получали именно структурные элементы СКК, на которых были смонтированы узлы крепления строп (рисунок 3.25). Таким образом, под единичным повреждением в настоящей работе понимается разрушение четырех стержневых структурных элементов СКК, составляющих один из двадцати четырех узлов крепления строп подвески бака на СКК.

<sup>&</sup>lt;sup>\*</sup> Испытания проведены в ОАО «Информационные спутниковые системы» в рамках ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014—2020 годы», RFMEFI60714X0038»



Рисунок 3.25 – Зоны разрушения СКК

Рассмотрим два принципиально различных сценария накопления повреждений. В первом из них (I) структурные элементы разрушаются таким образом, чтобы оставшиеся связи в

90

горизонтальной плоскости располагались симметрично относительно вертикальной оси, проходящей через центр тяжести бака. Второй сценарий (II), напротив, предполагает последовательное возникновение повреждений в окружном направлении. Номера и количество разрушенных узлов в соответствии со схемой на рисунке 3.24 в каждом из сценариев содержатся в таблице 3.5.

В соответствии с таблицей 3.5 для конечно-элементной модели колебательной системы реализовано семь вычислительных экспериментов для сценария I и двадцать один вычислительный эксперимент для сценария II, в ходе каждого из которых из модели удалялись соответствующие стержневые элементы, и выполнялся повторный модальный анализ с фиксацией низшей частоты.

Степень поврежденности	I: независимое повреждение (осесимметричное)	II: накопительное повре- ждение (последователь- ное)
1		1
2		1-2
3		1-3
4	1, 7, 13, 19	1-4
5		1-5
6		1-6
7		1-7
8	1, 4, 7, 10, 13, 16, 19, 22	1-8
9		1-9
10		1-10
11		1-11
12	1, 3, 5, 7, 9, 11, 13, 15, 17, 19, 21, 23	1-12
13		1-13
14		1-14
15		1-15
16	1, 2, 4, 5, 7, 8, 10, 11, 13, 14, 16, 17, 19, 20, 22, 23	1-16
17		1-17
18	1-3, 5-7, 9-11, 13-15, 17-19, 21-23	1-18
19		1-19
20	1-5, 7-11, 13-17, 19-23	1-20
21		1-21
22	1-11, 13-23	-

Таблица 3.5 – Сценарии разрушения связей

Низшая собственная частота колебаний неповрежденной конструкции составляет  $f_1$  = 19,1 Гц. При удалении отдельных структурных элементов СКК частота постепенно снижается. В качестве количественной характеристики живучести рассмотрим зависимость вида (3.10) для двух сценариев развития повреждений (рисунок 3.26). В качестве степени поврежденности в данном случае в соответствии с (3.12) рассматривалось накопленное количество разрушенных узлов крепления строп на СКК.



Рисунок 3.26 – Зависимости  $S^r = f_{1i}/f_1 = h(d)$  для двух сценариев накопления повреждений

Аппроксимация полученных зависимостей полиномами позволила получить следующие выражения с конкретизацией формы функции *h*(*d*):

для I сценария  $S^r = -8 \cdot 10^{-7} d^6 + 5 \cdot 10^{-5} d^5 - 0,0011 d^4 + 0,0118 d^3 - 0,0595 d^2 + 0,1032 d + 1;$ для II сценария  $S^r = 10^{-5} \cdot d^4 - 0,0005 \cdot d^3 + 0,002 \cdot d^2 + 0,0092 \cdot d + 0,9957.$ 

Как видно из полученных зависимостей, в первом варианте сценария накопления повреждений низшая собственная частота характеризуется низкой чувствительностью к разрушениям отдельных структурных элементов: при разрушении 12 узлов крепления частота снижается только на 6 % ( $f_{1 d=12}/f_1 = 0,94$ ), 16 узлов – на 14 % ( $f_{1 d=16}/f_1 = 0,86$ ). При дальнейшем увеличении степени поврежденности частота начинает интенсивно снижается, при d > 20 падая практически до 0. Во втором варианте сценария чувствительность низшей собственной частоты к повреждениям выше: снижение на 6 % наблюдается уже при разрушении 6 узлов крепления ( $f_{1 d=6}/f_1 = 0,94$ ), при разрушении 12 узлов частота падает на 38 % ( $f_{1 d=12}/f_1 = 0,62$ ).

Таким образом, при первом сценарии накоплении повреждений живучесть конструкции оказывается гораздо выше, поскольку динамические характеристики колебательной системы остаются достаточно стабильными при разрушении достаточно большого количества узлов крепления СКК.

В настоящем подразделе показано, что оценка живучести колебательных систем может осуществляться путем построения и анализа зависимостей собственных частот колебаний от степени поврежденности конструкции. В качестве таковой для колебательных систем, включающих в свой состав стержневые конструкции, целесообразно рассматривать количество разрушенных (удаленных из расчетной модели) структурных элементов. Важнейшей частью технологии анализа живучести являются сценарии накопления повреждений: один и тот же объект может иметь совершенно различные характеристики живучести при реализации различных сценариев.

Рассматриваемый подход к оценке живучести успешно апробирован при анализе динамических свойств ксенонового бака высокого давления, входящего в состав электрореактивного двигателя космического аппарата, на силовой конструкции корпуса при различных вариантах повреждения последней.

# 3.4 Оценка структурной живучести прецизионных конструкций стержневого типа

Прецизионные конструкции в большинстве случаев представляют собой структурно сложные технические объекты, к одному или нескольким элементов которых предъявляются специальные требования по точности обеспечения функциональных характеристик на всех стадиях жизненного цикла. Такие функциональные характеристики будем называть параметрами (параметром) прецизионности.

Требования прецизионности возникают в системах различной природы. Для конкретизации рассуждений и обоснований зададимся типом технических объектов, для которых выполняются два требования:

 к объекту предъявляются требования прецизионности, причем параметр прецизионности должен подвержен влиянию процессов деформирования и разрушения структурных элементов конструкции;

 объект должен содержать в своем составе развитую пространственную стержневую конструкцию, поведение которой обусловливает текущее значение параметра прецизионности.

Эти требования обусловлены как областями исследований, регламентируемыми паспортом специальности 01.02.06, так и объектом и предметом диссертационной работы («живучесть повреждаемых стержневых конструкций»).

В качестве такого объекта примем конструкцию крупногабаритного прецизионного рефлектора зеркальных антенн спутниковой связи. Основными функциональными подсистемами рефлектора являются зеркало, к геометрической (формо-) стабильности которого предъявляются требования прецизионности, и силовой каркас, деформирование (повреждение) которого непосредственным образом определяют стабильность геометрических характеристик зеркала.

Требования прецизионности вытекают из физико-технических принципов работы зеркальных антенн. При работе на частоте *f*<sub>z</sub> соответствующая длина радиоволны определяется как

$$\lambda_r = \frac{c}{f_z},\tag{3.16}$$

где *с* – скорость распространения электромагнитной волны в вакууме (скорость света).

Максимальное линейное отклонение фактической формы элементов зеркала от теоретической по нормали к ней обычно не должно превышать

$$u_{\max}^* = k_\lambda \cdot \lambda_r$$

где  $k_{\lambda}$  – коэффициент, характеризующий порядок отклонения (в долях от  $\lambda_r$ ), при котором еще не возникает существенного снижения эффективности антенны [99]. В первом приближении можно принять  $k_{\lambda} = 1/10 \dots 1/16$ .

Интегральный учет этих отклонений по всей поверхности зеркала осуществляется с помощью величины среднеквадратического отклонения (с.к.о.) геометрии рабочей поверхности от теоретического профиля [205<sup>12</sup>]

$$\delta = \sqrt{\frac{1}{S} \int_{S} d^{2}(r_{a}) dS} = \sqrt{\frac{1}{N_{ja}} \sum_{i=1}^{N} (u_{i} - u_{a})^{2}},$$

где  $r_a = r_a(x, y, z)$  – радиус-векторы точек отражающей поверхности; d(r) – квадрат отклонения отражающей поверхности от поверхности *S* идеального параболоида;  $N_{ja}$  – количество узлов сетки на поверхности зеркала при ее дискретизации;  $u_i$  – суммарное (по осям декартовой системы координат) поступательное перемещение *i*-го узла сетки;  $u_a$  – суммарное поступательное перемещение, усредненное по *N* узлам сетки.

Таким образом, для рассматриваемого типа объектов следует рассматривать два параметра прецизионности:  $u_{\text{max}}^*$ , имеющий явное физико-техническое обоснование, и  $\delta$ , являющийся синтетической величиной, значения которой не вытекают непосредственно из принципов работы антенны как радиотехнического устройства, а назначается директивно по опыту эксплуатации аналогичных объектов. Очевидно наличие связи между параметрами  $u_{\text{max}}^*$  и  $\delta$ , но сама форма связи, как правило, неизвестна и не исследуется.

В качестве параметра прецизионности, характеризующего геометрическую стабильность рефлектора на стадии инженерного проектирования, обычно рассматривают именно среднеквадратическое отклонение. В силу исключительной важности этого параметра для обеспечения эффективной работы зеркальной антенны, он рассматривается в качестве одного из проект-

<sup>&</sup>lt;sup>12</sup> В публикации [205] личный вклад соискателя заключается в определении среднеквадратического отклонения поверхности зеркала рефлектора и составляет 30 % от объема всей публикации.

ных параметров, участвует в формулировке целевой функции и ограничений при формулировке задач практической оптимизации [178<sup>13</sup>] и верификации результатов проектирования [63<sup>14</sup>]. Несмотря на то, что таким образом полностью удовлетворяются требования прецизионности на этапе проектирования, актуальным является вопрос о возможности удовлетворения этим требованиям при возможном повреждении (разрушении) структурных элементов стержневого каркаса при эксплуатации.

Количественные показатели живучести предлагается определять в натуральных или относительных величинах следующим образом

$$S^{a} = u_{\max_{i}} = h(d); \quad S^{a} = \delta_{i} = h(d);$$
 (3.17)

$$S^{r} = \frac{u_{\max 0}}{u_{\max i}} = h(d); \quad S^{r} = \frac{\delta_{0}}{\delta_{i}} = h(d), \quad (3.18)$$

где  $u_{\max_i}$ ,  $\delta_i$  – соответственно максимальное линейное отклонение и с.к.о. поверхности зеркала при *i*-ом повреждении каркаса;  $u_{\max_0}$ ,  $\delta_0$  – соответственно максимальное линейное отклонение и с.к.о. поверхности зеркала при неповрежденном каркасе.

В качестве критериев живучести предлагается рассматривать условия непревышения текущими значениями  $u_{\max_{i}}$ ,  $\delta_{i}$  параметров прецизионности поврежденной конструкции их критических величин  $u_{\max}^{*}$ ,  $\delta^{*}$ :

$$u_{\max_i} < u_{\max}^*; \qquad \qquad \delta_i < \delta^* \tag{3.19}$$

Рассмотрим возможности получения оценок живучести для конкретного технического объекта, для которого предъявляются требования прецизионности.

Объектом исследования является крупногабаритный прецизионный рефлектор зеркальной антенны наземных систем спутниковой связи  $Q/K_a$ -частотного диапазона (рисунок 3.27). Диаметр рефлектора составляет 12 м. Каркас (рисунок 3.28) представляет собой пространственную стержневую конструкцию. Стержни представлены трубами квадратного поперечного сечения 60×60 мм. Используется два варианта толщины стенки труб: на периферии 1,4 мм, в области ступицы 2,8 мм. Соединение труб осуществляется с использованием фитингов (толщина стенки 2,8 мм) посредством болтовых и клеевого соединений.

<sup>&</sup>lt;sup>13</sup> В публикации [178] результаты, полученные соискателем лично, составляют 100 % от объема всей публикации <sup>14</sup> В публикации [63] личный вклад соискателя заключается в определении характеристик НДС для подтверждения прочности каркаса рефлектора и составляет 30 % от объема всей публикации.



Рисунок 3.27 – Общий вид рефлектора



Рисунок 3.28 – Строение каркаса рефлектора

Конечно-элементная модель (рисунок 3.29) построена с использованием одномерных балочных (каркас), двумерных оболочечных (сегменты зеркала) и трехмерных (детали ступицы) конечных элементов. Модель содержит порядка 2,25 миллионов узлов и 960 тысяч элементов. Размерность модели обусловлена исследованием сходимости результатов (расчетных напряжений и деформаций) по сетке конечных элементов.

Оценка формостабильности выполнена при действии ветрового давления, соответствующего скорости воздушного потока 20 м/с, собственного веса конструкции (гравитации) при закреплении ступицы по трем площадкам, соответствующим условиям крепления конструкции на опорно-поворотном устройстве (рисунок 3.30).



Рисунок 3.29 – Изображение конечно-элементной модели прецизионного рефлектора



Рисунок 3.30 – Граничные условия при действии воздушного потока скоростью 20 м/с

В результате статического анализа НДС неповрежденной конструкции установлено, что наиболее нагруженными являются стержни каркаса в приступичной области. Среди них в большей мере нагружены стержни, примыкающие к нижней опорной части ступицы. В связи с этим сформулированы три сценария последовательного повреждения стержней:

I – разрушение стержней верхнего яруса каркаса, расположенные в приступичной области в непосредственной близости от отражающего зеркала (рисунок 3.31): удалению из расчетной схемы последовательно подвергаются 45 стержней верхнего яруса, при точке зрения противоположно направлению фокальной оси – удаление осуществляется по часовой стрелке;

II – разрушение стержней нижнего яруса каркаса, расположенные в приступичной области (рисунок 3.32): удалению из расчетной схемы последовательно подвергаются 45 стержней нижнего яруса, при точке зрения вдоль направления фокальной оси – удаление осуществляется по часовой стрелке;

III – разрушение стержней нижнего яруса, непосредственно соединенных с приопорной частью ступицы (рисунок 3.33): удалению из расчетной схемы последовательно подвергаются

30 стержней, при точке зрения вдоль направления фокальной оси – удаление осуществляется по часовой стрелке.



Рисунок 3.31 – Стержневые структурные элементы каркаса, разрушаемые в соответствии с I сценарием

Рисунок 3.32 – Стержневые структурные элементы каркаса, разрушаемые в соответствии со II сценарием



Рисунок 3.33 – Стержневые структурные элементы каркаса, разрушаемые в соответствии с III сценарием

Символом «1» на рисунках 3.31 – 3.33 показан структурный элемент, удаляемый на первом шаге сценария.

Рассматриваемый объект предназначен для работы в частотных диапазонах  $Q/K_a$  (частоты  $f_z = 42,5-45,5 / 18,2-21,2 \Gamma \Gamma \mu$ ). Соответствующие длины волн определяются по формуле (3.16) и составляют для диапазонов Q и  $K_a$  соответственно

$$\lambda_r = \left[299792458/42, 5 \cdot 10^9; 299792458/45, 5 \cdot 10^9\right] = \left[7,05 \cdot 10^{-3}; 6,59 \cdot 10^{-3}\right] \text{ m};$$

$$\lambda_r = \left[299792458/18, 2 \cdot 10^9; 299792458/21, 2 \cdot 10^9\right] = \left[1,65 \cdot 10^{-2}; 1,41 \cdot 10^{-2}\right] \text{ M}$$

Интервальная оценка максимального линейного отклонения формы рефлектора составит

$$k_{\lambda}\lambda_{r} = \left[6,59 \cdot 10^{-3}/16; 1,65 \cdot 10^{-2}/10\right] = \left[4,12 \cdot 10^{-4}; 1,65 \cdot 10^{-3}\right] \mathbf{M} = \left[0,412; 1,65\right] \mathbf{M} \mathbf{M} \ .$$

Оценим живучесть конструкции исходя из максимально допустимого отклонения формы зеркала  $u_{\text{пах}}^* = 1,65$  мм. На рисунках 3.34-3.36 показаны полученные с использованием исследования конечно-элементной модели (рисунки 3.29, 3.30) расчетные зависимости  $\delta$  и максимального отклонения поверхности зеркала от степени поврежденности *d* вида (3.17). На этих же графиках показано максимальные напряжения в оставшихся неразрушенными структурных элементах. Как видно из сопоставления графиков, при последовательном разрушении структурных элементов параметры прецизионности растут гораздо быстрее значений напряжений, которые ни в одном из сценариев не достигают опасных значений (менее 100 МПа при пределе прочности 803 МПа). Это подтверждает целесообразность для рассматриваемой конструкции живучесть рассматривать именно с позиций прецизионности, а не с позиций несущей способности.



Рисунок 3.34 – Максимальное отклонение геометрии (а) и с.к.о., напряжения (б) зеркала в зависимости от степени поврежденности при реализации I сценария



Рисунок 3.35 – Максимальное отклонение геометрии (а) и с.к.о., напряжения (б) зеркала в зависимости от степени поврежденности при реализации II сценария



100

Рисунок 3.36 – Максимальное отклонение геометрии (а) и с.к.о., напряжения (б) зеркала в зависимости от степени поврежденности при реализации III сценария

Полиномиальная аппроксимация полученных зависимостей для трех сценариев накопления повреждений имеет вид

$$u_{\text{max}}^{I}(d) = 5 \cdot 10^{-5} \cdot d^{2} + 0,0092 \cdot d + 1,5793$$
$$u_{\text{max}}^{II}(d) = -6 \cdot 10^{-5} \cdot d^{2} + 0,0305 \cdot d + 1,5977$$
$$u_{\text{max}}^{III}(d) = 2 \cdot 10^{-7} \cdot d^{2} + 0,0027 \cdot d + 1,613$$
$$\delta^{I}(d) = 5 \cdot 10^{-6} \cdot d^{2} + 0,0019 \cdot d + 0,29$$
$$\delta^{II}(d) = -4 \cdot 10^{-5} \cdot d^{2} + 0,0077 \cdot d + 0,2982$$
$$\delta^{III}(d) = -9 \cdot 10^{-8} \cdot d^{2} + 0,0005 \cdot d + 0,2983$$

Зависимости относительных показателей живучести от степени поврежденности (3.18) принимают вид, показанный на рисунке 3.37.



Рисунок 3.37 – Зависимости  $S^r = \delta_0 / \delta_i = h(d)$  для трех сценариев разрушения

Как видно из полученных результатов, критерии живучести нарушаются при разрушении 8 стержней при реализации первого сценария, 3 стержней при реализации второго сценария, 11 стержней при реализации третьего сценария накопления повреждений. Таким образом, группа стержней нижнего яруса каркаса в приступичной области обладает наименьшим запасом живучести по сравнению с двумя другими рассматриваемыми группами структурных элементов. При реализации второго сценария конструкция оказывается наименее, а третьего – наиболее живучей.

## 3.5 Результаты и выводы по разделу 3

Определено понятие структурной живучести стержневых конструкций как их свойство сохранять ограниченную работоспособность при наличии повреждений определенного вида (разрушение структурных элементов и/или связей между ними), обеспечиваемое структурой (конструктивной схемой) и выражающееся в количественных показателях чувствительности той или иной функциональной характеристики к дефектам и повреждениям структуры.

Сформулирована и практически апробирована методика оценки структурной живучести стержневых конструкций, заключающаяся в выборе их функциональных характеристик, определении показателей и критериев живучести в связи с функциональными характеристиками, обосновании сценариев накопления повреждений и исследовании зависимостей (чувствительности) показателей живучести от степени поврежденности.

Для оценки структурной живучести пространственных силовых стержневых конструкций предложены показатели живучести в виде максимальных напряжений и минимальных фактических запасов прочности, определяемых при анализе переходных процессов, возникающих при реализации последовательности (сценария) повреждения структурных элементов. В случае последовательного разрушения структурных элементов предлагается показатель живучести, характеризующий глубину сценария накопления повреждений – количество шагов разрушения до нарушения критериев живучести. В качестве критериев живучести рассматриваются прочностные характеристики (предельные напряжения) конструкционного материала. Получены количественные оценки структурной живучести силовых стержневых конструкций каркаса телекоммуникационного контейнера и мачты.

Для оценки структурной живучести колебательных систем стержневого типа сформулированы показатели живучести в виде собственных частот свободных колебаний, изменяющихся в связи с уровнем накопленных повреждений структуры. Критериями живучести являются ограничения по величине и диапазону неприемлемых собственных частот. Получены количественные оценки структурной живучести колебательной системы бака высокого давления электрореактивных двигателей космических аппаратов при реализации двух сценариев накопления повреждений структуры.

Для оценки структурной живучести прецизионных конструкций стержневого типа определены показатели живучести в виде параметров прецизионности, зависящих от степени поврежденности стержневой структуры. Для рефлектора крупногабаритной зеркальной антенны наземных систем спутниковой связи в качестве параметров прецизионности максимальное линейное отклонение и среднеквадратическое отклонение формы деформируемого зеркала от первоначальной формы, соответствующей идеальному параболоиду. Критериями, соответственно, являются предельные отклонения, определяемые требуемой эффективностью работы антенны. Получены количественные оценки структурной живучести рефлектора при реализации трех сценариев накопления повреждений структуры каркаса. 4 Оценка живучести повреждаемых структурно-сложных узлов сочленения стержневых элементов

#### 4.1 Подход к оценке живучести узлов сочленения

Основным функциональным назначением узлов сочленения является обеспечение согласованного деформирования, неразрывности силового потока между входящими в узел стержневыми элементами. В связи с этим под живучестью поврежденного узла сочленения будем понимать его свойство сохранять конструкционную целостность при наличии повреждений, которая в рассматриваемом контексте означает обеспечение согласованного деформирования всех стержней и неразрывность силового потока между ними.

Узлы сочленения стержневых элементов в большинстве случаев являются структурносложными объектами. Они могут содержать элементы из разных конструкционных материалов и использовать различные физико-технические способы крепления стержней в узле сочленения. Разнообразие конструктивных решений, физико-технических принципов взаимодействия элементов узла сочленения делает крайне затруднительной разработку детальной и подробной методики анализа живучести узлов – ряд принципиальных аспектов будут определяться непосредственно к каждому конкретному объекту исследования. В связи с этим определим методический подход к анализу живучести укрупненно, в общем виде, в предположении его адаптации в связи с конкретными особенностями конструктивного варианта узла.

В силу структурной сложности узлов, наличия нескольких структурных элементов и многообразия возможных механических взаимодействий между ними, очевидно, возможны различные варианты предельных состояний и нарушения работоспособности. Детальный анализ живучести предполагает учет всех возможных вариантов поведения повреждаемого узла в связи с чем обязательным компонентом методики анализа живучести следует считать обоснование сценариев накопления повреждений и разрушения узла сочленения, учитывающих все возможные взаимодействия структурных элементов.

В связи с принятой трактовкой понятия живучесть узла сочленения в качестве критерия живучести следует рассматривать сохранение конструкционной целостности при реализации каждого сценария накопления повреждений и разрушения. То есть, если при реализации некоторого из возможных сценариев накопления повреждений узел сочленения сохраняет конструкционную целостность и способность передавать силовой поток между входящими в узел стержневыми элементами, живучесть следует считать обеспеченной по этому сценарию. В свою очередь, если живучесть обеспечена по всем возможным сценариям накопления повреждений, живучесть узла следует считать обеспеченной безусловно. Определение количественных показателей живучести узлов сочленения, аналогично тому, как это было сделано при анализе структурной живучести в разделе 3, затруднено тем, что не удается определить единственный параметр, определяющий конструкционную целостность узла, с целью исследовать его зависимость от степени поврежденности. В связи с этим предлагается оценка живучести в соответствии со следующей методикой.

Рассматриваются три потенциально возможные варианта исхода реализации сценария накопления повреждений:

вариант 1 – один или несколько последовательных актов (событий) повреждения (локального разрушения) не приводят к потере конструкционной целостности. Поврежденный узел полностью сохраняет свою работоспособность;

вариант 2 – несколько (не менее двух) последовательных актов повреждения приводят к потере конструкционной целостности узла;

вариант 3 – единственный акт локального повреждения приводит к потере конструкционной целостности узла.

Тогда введем ранг живучести, который будем считать равным 1 при реализации сценария накопления повреждений с первым вариантом реализации исхода (конструкционная целостность обеспечена при наличии последовательности повреждений). При реализации сценария с третьим вариантом исхода ранг живучести будем считать равным 0 (конструкционная целостность не обеспечена при единственном повреждении). Соответственно, при реализации сценария накопления повреждений со вторым вариантом исхода, ранг живучести будем считать равным 0,5 (конструкционная целостность обеспечена как минимум при одном повреждении).

Возможность реализации того или иного сценария накопления повреждений определяется как системными свойствами узла сочленения, так и уровнем его нагруженности в составе конкретного технического объекта. Очевидно, конструктивно идентичные узлы сочленения, нагруженные по-разному даже в составе одной и той же технической системы, потенциально имеют один и тот же уровень живучести, но фактически реализуется уровень, соответствующий реально осуществившемуся сценарию.

Тогда потенциальный, системно обусловленный ранг живучести определим следующим образом. В результате исследования всех возможных сценариев накопления повреждений устанавливается количество  $n_1$  сценариев с первым вариантом исхода,  $n_2$  со вторым вариантом исхода, и  $n_3$  с третьим вариантом исхода. Потенциальный ранг определяется в диапазоне от 0 (живучесть не обеспечена при любом повреждении) до 1 (живучесть обеспечена при любых повреждения) как

$$Z = \frac{n_1 \cdot 1 + n_2 \cdot 0, 5 + n_3 \cdot 0}{n_1 + n_2 + n_3}.$$
(4.1)

Для оценки живучести при определенном уровне нагружения необходимо построение и исследование логико-вычислительной модели, реализующей сценарии накопления повреждений.

Рассмотрим далее применение этого подхода к одному из конструктивных вариантов узла сочленения стержневого каркаса рефлектора зеркальной антенны наземных систем спутниковой связи.

# 4.2 Модели структуры и возможных взаимодействий узла сочленения для обоснования сценариев накопления повреждений

Различные сценарии силового взаимодействия деталей и условий возникновения и развития повреждений структурно-сложных узлов сочленения не могут быть описаны в рамках простых моделей с малым количеством параметров. Требуется обоснование сценариев в связи со структурой узла сочленения, свойствами и возможными взаимодействиями его элементов.

Предлагается методика к обоснованию сценариев повреждения узлов сочленения, включающая в себя следующие основные процедуры:

- изучение состава и построение структурной модели узла;

– анализ связей и возможных взаимодействий структурных элементов, построение структурной модели узла, учитывающей взаимодействия структурных элементов;

 – логический анализ возможных последовательностей возникновения и развития повреждений, построение сценарной диаграммы развития повреждений, учитывающей взаимосвязь и взаимообусловленность процессов накопления повреждений;

 выбор критериев прочности, дополняющих сценарную диаграмму развития повреждений для последующего количественного анализа;

- разработка и исследование вычислительной модели живучести.

Предложенная методика является самодостаточной и позволяет осуществить полный цикл анализа живучести – от предварительного изучения конструктивного решения до получения количественных оценок живучести на множестве всех возможных сценариев накопления повреждений, обусловленных интервалом изменения комплекса нагрузок и воздействий процедуры методики слабоформализуемы. Рассмотрим их применение на примере типовой конструкции узла сочленения элементов стержневого каркаса рефлектора антенны

наземных систем спутниковой связи (рисунки 3.28, 3.39) [206<sup>15</sup>].

Несмотря на большое количество конструктивных вариантов узла (рисунок 4.1), можно выделить для анализа элементарную, повторяющуюся часть. Она включает в себя трубу и фитинг из полимерных композиционных материалов различной структуры, стальные обойму, болты и гайки (рисунок 4.2, а). Несмотря на небольшое число конструкционных элементов (деталей), объединение их в систему осуществляется с помощью разнородных физикотехнических связей: резьбовых и клеевых соединений, фрикционных взаимодействий. Это формирует высокую степень структурной неоднородности конструкции.

Анализ структуры и внешних силовых воздействий (рисунок 4.2, б) позволили построить структурную модель узла (рисунок 4.2, в).



Рисунок 4.1 – Варианты узлов сочленения стержней каркаса с использованием фитингов: a), б) 3 стержня, в) 4 стержня, г) 5 стержней, д) 7 стержней, е) 8 стержней, ж), з) 9 стержней

<sup>&</sup>lt;sup>15</sup> В публикации [206] личный вклад соискателя заключается в разработке информационной и вычислительной модели накопления повреждений и живучести узла сочленения стержневого каркаса рефлектора и составляет 60 % от объема всей публикации.



а



б



В

Рисунок 4.2 – Конструкция (а), расчетная схема (б) и структурная модель узла сочленения трубы с фитингом (рисунок 4.1, в) (в): 1 – труба; 2 – фитинг; 3 – обойма; 4 – болт; 5 – гайка; C1, C2 – резьбовые соединения; C3 – клеевое соединение; C4-C15 – фрикционные взаимодействия; Δ – зазор

Совокупность элементов конструкции и их связей представляют собой модель взаимодействия элементов узла сочленения (рисунок 4.3).



Рисунок 4.3 – Модель взаимодействия структурных элементов узла соединения трубы с фитингом

Из анализа структуры узла очевидна принципиальная возможность среза болтов при достаточно больших значениях силы  $F_{st}$ . Но неочевиден возможный характер повреждения композитных деталей. Для уточнения возможного характера повреждения композитных деталей узла проведены его экспериментальные исследования на растяжение. Испытания проведены на испытательной машине Tinius Olsen 100ST (рисунок 4.4).



Рисунок 4.4 – Испытательная машина с установленным образцом
Испытанию подвергались два типа образцов: 1 – композитные детали соединены болтами (рисунок 4.5, а); 2 – композитные детали склеены, две заклепки не являются силовыми и предназначены для удобства монтажа (рисунок 4.5, б).



Рисунок 4.5 – Испытательные образцы болтового (а) и клеевого (б) соединений

В результате эксперимента установлена возможность следующих повреждений:

- смятие композитных деталей преднатяженными болтами (рисунок 4.6, а);

– повреждения клеевого слоя и смещения деталей друг относительно друга (рисунок 4.6,

б);

смятия и повреждения деталей болтами в направлении растягивающей силы (рисунок 4.6, в).



а



зона смещения деталей





разрушения детали

В

Рисунок 4.6 – Характерные повреждения композитных деталей

Повреждения и локальные разрушения происходят в различные периоды времени в течение жизненного цикла. Принципиально важно рассматривать эти повреждения как взаимосвязанные события и процессы. Методический подход к построению модели накопления повреждений, учитывающей структурные взаимодействия элементов конструкции, взаимосвязь и взаимообусловленность процессов накопления повреждений, обосновывается следующим образом. Многоуровневый процесс накопления повреждений описывается ориентированным графом, где вершины представляют собой понятия предметной области (в данном случае повреждения как состояния, ассоциированные с той или иной неоднородностью), а дуги – отношения между вершинами. В данном случае имеем дело с отношениями причинности. Таким образом, построенный граф представляет собой обобщенный сценарий развития повреждений, связанных с теми или иными неоднородностями, вплоть до потери конструкционной целостности. Многоуровневость процесса повреждений характеризуется количеством дуг, связывающих одновременно протекающие процессы развития повреждений. Сами же отношения причинности не обязательно имеют смысл детерминированной обусловленности, а могут отражать различную степень причинной обусловленности. Рассматриваемая модель соответствует пониманию многоуровневого процесса накопления повреждений как системы, в которой существует взаимовлияние и взаимообусловленность развития отдельных повреждений.

Таким образом, модель накопления повреждений описывает сценарий многоуровневого процесса накопления повреждений (рисунок 4.7). С вершинами графа, описывающими повреждения, ассоциируются конструктивные элементы, в которых эти повреждения локализованы.



 $\mathbf{X}_i \rightarrow \mathbf{C}_j$  – разрушение *i*-й и возникновение *j*-й связи

### Рисунок 4.7 – Модель накопления повреждений узла сочленения (обозначения в соответствии с рисунком 4.2)

Формулировки условий прочности, соответствующих рассматриваемым повреждениям и определяющих конструкционную целостность узла, имеют следующий вид (таблица 4.1).

Предельное со-	Формулировки условий проиности							
стояние	формулировки условии прочности							
Смятие деталей	$\sigma < \sigma_{cr}^{f}, \sigma < \sigma_{cr}^{s}, \sigma < \sigma_{cr}^{p}, $ где $\sigma = F_{0}^{real}/A^{k}$ – максимальные эквивалентные напряжения в							
преднатяженными	зоне контакта; $F_0^{real}$ – реальное (фактическое) усилие затяжки болта; $A^k$ – пло-							
болтами	щадь контактного взаимодействия деталей; $\sigma_{cr}^{f}$ , $\sigma_{cr}^{s}$ , $\sigma_{cr}^{p}$ – соответственно проч-							
	ность на смятие фитинга, обоймы, трубы.							
Ослабление за-	$E^{real} < E^{calc}$ $E^{calc}$ $E^{calc}$							
тяжки болтов	$F_0 = \langle F_0 \rangle$ , где $F_0 = -$ расчетное (проектное) усилие затяжки оолта.							
Разрушение клее-	σ <sub>glue</sub> < σ <sub>glue</sub> , где σ <sub>glue</sub> – эквивалентные напряжения в клеевом слое;							
вого слоя	$\sigma_{glue_{cr}}$ – прочность клеевого слоя.							
Нарушение плот-	$\tau < \mu_s \cdot P$ , где $\mu_s$ – коэффициент трения покоя; $\tau$ – предельное касательное напряже-							
ности соединения	ние трения; Р – нормальное контактное давление.							
Разрушение	$\sigma^{s} < \sigma_{b}^{s}$ , где $\sigma^{s}$ – максимальные эквивалентные напряжения в обойме;							
обоймы	$\sigma_b^{s}$ – временное сопротивление разрушению материала обоймы.							
Разрушение фи-	$\sigma^{f} < \sigma_{b}^{f}$ , где $\sigma^{f}$ – максимальные эквивалентные напряжения в фитинге;							
тинга	$\sigma_b^f$ – временное сопротивление разрушению материала фитинга.							
Разрушение трубы	$\sigma^{p} < \sigma_{b}^{p}$ , где $\sigma^{p}$ – максимальные эквивалентные напряжения в трубе;							
	$\sigma_b^p$ – временное сопротивление разрушению материала трубы.							
Срез болтов	$\tau^{b} < \tau^{b}_{cut}$ , где $\tau^{b}$ – максимальное касательное напряжение в сечении болта;							
_	$\tau^{b}_{cut}$ – предел прочности материала болта на срез.							

Таблица 4.1 – Условия прочности

Модель накопления повреждений является качественной. Она характеризует «глубину» процесса накопления повреждений – количество разнородных повреждений, воспринимаемых конструкцией до потери ее конструкционной целостности. На схеме (рисунок 4.7) это выражается количеством дуг (стрелок), соединяющих вершины графа.

Аналогичным образом могут быть построены модели структуры и возможных взаимодействий структурных элементов для обоснования сценариев повреждения узлов сочленения любой конфигурации.

# 4.3 Разработка структуры логико-вычислительной модели анализа живучести и определение множества сценариев накопления повреждений

На основании моделей структуры и возможных взаимодействий элементов узла сочленения, в том числе, условий прочности, соответствующих их повреждениям (раздел 4.2), разработана и практически реализована логико-вычислительная модель анализа живучести узла сочленения, позволяющая получить количественные оценки возможностей перехода от одного состояния поврежденности к другому, условий осуществления той или иной ветви сценария. Вычислительная модель позволяет анализировать поведение конструкции как в неповрежденном состоянии, так и в различных поврежденных состояниях.

Для описания поведения физико-технических эффектов, возникающих при возникновении и развитии повреждений в соответствии с моделью их накопления (рисунок 4.7) в большинстве случаев достаточно алгоритмов и процедур, содержащихся в разделе 2.3. Что касается анализа возможности смещения деталей относительно друг друга при повреждении клеевого слоя или ослаблении болтового соединения, используется модель трения в форме закона Амонтона-Кулона

$$\tau_{\lim} = \mu_s \cdot P, \qquad (4.2)$$

где  $\tau_{lim}$  – предельное касательное напряжение трения;

μ<sub>s</sub> – коэффициент трения покоя;

Р – нормальное контактное давление, определяемое усилием преднатяжения болта.

В контактном слое деталей, прижатых друг к другу преднатяжением болтов, при действии растягивающей силы возникают касательные напряжения.

$$\tau=\sqrt{\tau_{_1}^2+\tau_{_2}^2}$$
 ,

где  $\tau_1$ ,  $\tau_2$  – касательные напряжения в двух взаимно перпендикулярных направлениях. Поведение контактирующих тел определяется в соответствии с выражением

$$\tau < \tau_{\lim} \,. \tag{4.3}$$

При выполнении (4.3) контактирующие тела удерживаются от смещения относительно друг друга силой трения. В противном случае начинается взаимное смещение тел. Условием его продолжения является неравенство

$$\tau \ge \mu_d \cdot P \,, \tag{4.4}$$

где  $\mu_d$  – коэффициент трения скольжения ( $\mu_s \ge \mu_d$ ).

С использованием рассматриваемых моделей структуры, возможных взаимодействий накопления повреждений и модели трения разработанная структура логико-вычислительной модели анализа живучести [179<sup>16</sup>, 208<sup>17</sup>] выглядит следующим образом (рисунок 4.8).

<sup>&</sup>lt;sup>16</sup> В публикации [179] личный вклад соискателя заключается в разработке вычислительной модели деформирования и разрушения узла сочленения силового каркаса, описаны условия нарушения работоспособности узла, обусловленные возникновением различных состояний поврежденности и составляет 35 % от объема всей публикации. <sup>17</sup> В публикации [208] личный вклад соискателя заключается в анализе деформирования и разрушения структурнонеоднородного узла сочленения. Выполнено математическое описание взаимодействующих (контактирующих) деталей узла сочленения и составляет 60 % от объема всей публикации



Рисунок 4.8 – Структура логико-вычислительной модели анализа живучести (накопления повреждений) узла сочленения стержневого каркаса

Вычислительная модель содержит пять условий, выполнение или невыполнение которых активизирует ту или иную ветвь/подветвь сценария:

$$\sigma < \sigma_{cr}^f, \sigma_{cr}^s, \sigma_{cr}^p \tag{4.5}$$

$$\sigma_{glue} < \sigma_{glue_{cr}} \tag{4.6}$$

$$\sigma^f, \sigma^s, \sigma^p < \sigma_b \tag{4.7}$$

$$\mathfrak{r} < \mu_s \cdot P \tag{4.8}$$

$$\tau^b < \tau^b_{cut} \tag{4.9}$$

Количество возможных сценариев не может быть определено по правилам комбинаторики как число исходов для пяти условий (4.5) – (4.9), проверка каждого из которых приводит к одному из возможных вариантов результата («да» – выполняется, «нет» – не выполняется). В реальности количество возможных сценариев оказывается существенно меньше, чем оценка по правилам комбинаторики, так как невозможны (лишены физического и технического смысла) многие комбинации условий. Именно структура логико-вычислительной модели (рисунок 4.8), определяемая структурой узла (рисунок 4.2), моделью взаимодействия структурных элементов узла (рисунок 4.3) и моделью накопления повреждений (рисунок 4.7), определяет перечень имеющих смысл сценариев, учитываемых при анализе и оценке живучести.

Рассмотрение условий (4.5) – (4.9) с учетом возможности их совместного осуществления в различных структурных элементах и связях приводит к множеству сценариев в соответствии с таблицей 4.2.

Для графической визуализации сценария его траектория показывается жирной линией на структурной схеме логико-вычислительной модели. Так, при отсутствии повреждений визуализация сценария работы неповрежденной конструкции отражена схемой на рисунке 4.9. Визуализация всех восемнадцати сценариев накопления повреждений (таблица 4.2) представлена в приложении Б.



Рисунок 4.9 – Траектория сценария работы неповрежденной конструкции

N⁰	Выполнение условий					вий	Порроклания		
сценария	(4.5-1)	$(4.5-1)^*$	(4.6)	(4.7)	(4.8)	(4.9-1)	(4.9-2)	(4.5-2)	повреждения
1	Нет	Нет	_	_	_	_	-	-	смятие деталей преднапряженными болтами вплоть до раз-
2	Нет	Па	Па	Па		_	_	_	смятие леталей преднапряженными болтами
3	Да		Дa	Нет	_	_	_	_	разрушение деталей при растяжении; потеря конструкцион- ной целостности
4	Да	_	Нет	Дa	Да	_	_	_	разрушение клеевого слоя
5	Дa	_	Нет	Нет	Дa	_	_	_	разрушение клеевого слоя; разрушение деталей при растя- жении; потеря конструкционной целостности
6	Нет	Дa	Дa	Нет	_	_	_	_	смятие деталей преднапряженными болтами; разрушение деталей при растяжении; потеря конструкционной целост- ности
7	Нет	Дa	Нет	Да	Дa	_	_	_	смятие деталей преднапряженными болтами; разрушение клеевого слоя
8	Нет	Да	Нет	Нет	Дa	_	_	_	смятие деталей преднапряженными болтами; разрушение клеевого слоя; разрушение деталей при растяжении; потеря конструкционной целостности
9	Нет	Дa	Нет	-	Нет	Дa	_	Дa	смятие деталей преднапряженными болтами; разрушение клеевого слоя; нарушение плотности соединения
10	Нет	Дa	Нет	_	Нет	Нет	Да	Да	смятие деталей преднапряженными болтами; разрушение клеевого слоя; нарушение плотности соединения; срез 1-го болта
11	Нет	Дa	Нет	-	Нет	Нет	Нет	_	смятие деталей преднапряженными болтами; разрушение клеевого слоя; нарушение плотности соединения; срез двух болтов; потеря конструкционной целостности
12	Нет	Да	Нет	_	Нет	Нет	Да	Нет	смятие деталей преднапряженными болтами; разрушение клеевого слоя; нарушение плотности соединения; срез 1-го болта; смятие деталей стержнем болта; потеря конструкци- онной целостности
13	Дa	_	Нет	—	Нет	Дa	—	Дa	разрушение клеевого слоя; нарушение плотности соединения
14	Да	—	Нет	-	Нет	Нет	Да	Да	разрушение клеевого слоя; нарушение плотности соедине- ния; срез 1-го болта

Таблица 4.2 – Варианты сценариев поврежденных состояний узла сочленения

# Продолжение Таблицы 4.2

N⁰			I	Зыполн	ение усло	овий	Поляниточна		
сценария	(4.5-1)	$(4.5-1)^*$	(4.6)	(4.7)	(4.8)	(4.9-1)	(4.9-2)	(4.5-2)	повреждения
15	Дa	_	Нет	-	Нет	Нет	Нет	-	разрушение клеевого слоя; нарушение плотности соедине- ния; срез двух болтов; потеря конструкционной целостности
16	Дa	_	Нет	_	Нет	Нет	Дa	Нет	разрушение клеевого слоя; нарушение плотности соедине- ния; срез 1-го болта; смятие деталей стержнем болта; потеря конструкционной целостности
17	Нет	Дa	Нет	_	Нет	Дa	_	Нет	смятие деталей преднапряженными болтами; разрушение клеевого слоя; нарушение плотности соединения; смятие деталей стержнем болта; потеря конструкционной целостности
18	Дa	_	Нет	_	Нет	Дa	_	Нет	разрушение клеевого слоя; нарушение плотности соедине- ния; смятие деталей стержнем болта; потеря конструкцион- ной целостности
Примечание: условие смятие деталей (4.5-1) головкой болта/гайкой и (4.5-2) стержнем болта; условие (4.9-1) срез 1-го болта и (4.9-2) срез 2-го болта.									

На основании рассматриваемого множества сценариев выполним оценку потенциально, системно обусловленного ранга живучести в соответствии с разделом 4.1.

Имеется  $n_1 = 7$  сценариев с первым вариантом исхода (№№ 2, 4, 7, 9, 10, 13, 14 (согласно Приложению Б)),  $n_2 = 10$  сценариев со вторым вариантом исхода (№№ 1, 5, 6, 8, 11, 12, 15, 16, 17, 18 (согласно Приложению Б)) и  $n_3 = 1$  сценарий с третьим вариантом исхода (№ 3 (согласно Приложению Б)).

Тогда согласно (4.1) ранг живучести для данного узла сочленения равен

$$Z = \frac{n_1 \cdot 1 + n_2 \cdot 0.5 + n_3 \cdot 0}{n_1 + n_2 + n_3} = \frac{7 \cdot 1 + 10 \cdot 0.5 + 1 \cdot 0}{7 + 10 + 1} = \frac{12}{18} = 0,66.$$

Рассмотрим далее примеры результатов, полученных при практической работе с логиковычислительной моделью живучести [177<sup>18</sup>, 207<sup>19</sup>].

## 4.4 Обоснование количественных параметров и исследование логиковычислительной модели анализа живучести узла сочленения

В рассматриваемом узле сочленения используются детали из тканых (фитинг) и однонаправленных (труба) композитных материалов (углепластиков) Для описания их поведения необходимо использовать ортотропные модели деформирования (2.14), характеризующиеся девятью независимыми упругими константами. Определение их экспериментальными методами, особенно определение трех независимых модулей сдвига, нестандартизовано и представляет собой элемент научной новизны [132]. Обоснование новых экспериментальных методик не входит в задачи настоящей диссертационной работы. В связи с этим принято решение воспользоваться апробированными значениями упругих констант, входящих в библиотеку композиционных материалов пакета *Ansys Workbench*.

Выбор осуществлялся из материалов, относящихся к классу эпоксидных углепластиков – однонаправленных (*Epoxy Carbon UD*) и тканых (*Epoxy Carbon Woven*). Для выбора конкретных материалов из перечня, содержащегося в библиотеке, проведены экспериментальные определе-

<sup>&</sup>lt;sup>18</sup> В публикации [177] результаты получены соискателем лично и составляют 100 % от объема всей публикации.

<sup>&</sup>lt;sup>19</sup> В публикации [207] личный вклад соискателя заключается в построении структурной, информационной, вычислительной модели узла сочленения стержневого каркаса наземного рефлектора, а также в анализе возможных повреждений и разрушений, в установлении зависимостей эквивалентных напряжений от усилия затяжки болта и составляет 60 % от объема всей публикации.

ния основных упругих констант и прочностных характеристик на образцах, вырезанных из фитинга и трубы узла сочленения<sup>\*\*</sup> (таблица 4.3).

Для определения характеристик механических свойств образцы исследуемых материалов испытывались на растяжение. В процессе испытаний определялись модуль упругости, коэффициент Пуассона и предел прочности.

Таблица 4.3 – Состав исследуемых материалов, размер и св	войства (	образцов
--	-----------	----------

Материал элемента	Наименование связу-	Наименование арматуры и	Геометрические разме-
конструкции	ющего и его плотность	ее плотность	ры образцов
Фитинг	T 67 (Инумит, Россия) 1,146 г/см <sup>3</sup>	Ткань биаксиальная углеродная Сва – 12104 (ХК Композит, Россия) 1,795 г/см <sup>3</sup>	а = 34,81±0,03 мм h <sub>t</sub> = 1,18±0,04 мм
Силовой каркас	Fortron 0205B4 PPS (США) 1,82 г/см <sup>3</sup>	Волокно Panex 35 Tow (Польша) 1,350 г/см <sup>3</sup>	а = 34,82±0,02 мм h <sub>t</sub> = 1,20±0,02 мм

*а* – длина, *h*<sub>t</sub> – толщина

Испытания проводились на универсальной испытательной машине Zwick/Roell Z100, имеющей предельную нагрузку 100 кН с ценой деления 1 Н. Продольные деформации измерялись как при помощи штатного экстензометра с ценой деления 0,001 мм, так и при помощи тензорезисторов. Поперечные деформации образцов измерялись при помощи штатного ширинометра с ценой деления 0,0001 мм и тензорезисторов.

Для жесткого закрепления образцов в захватах испытательной машины применялись накладки из стеклотекстолита с центрирующими отверстиями. В рабочей части образцов делались выточки. Перед испытаниями измерялись размеры поперечного сечения образцов с точностью до 0,01 мм в нескольких точках рабочей части.

В процессе испытаний строились диаграммы «усилие-деформация» (рисунок 4.10). При обработке диаграмм определялись характеристики механических свойств.

<sup>&</sup>lt;sup>\*\*</sup> Свойства материалов определены экспериментально к.т.н. Е.В. Москвичевым в рамках НИОКР по теме «Организация импортозамещающего производства крупногабаритных трансформируемых рефлекторов наземных и космических антенн из интеллектуальных полимерных композиционных материалов на основе безавтоклавных технологий».



Рисунок 4.10 – Диаграммы нагружения при растяжении образцов материала фитинга

Испытания образцов на растяжение проводилась по ГОСТ 32656-2014 [53]. Модуль упругости определялся по формуле

$$E = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon},\tag{4.10}$$

где Δσ, Δε – приращение напряжений и приращение относительных продольных деформаций на прямолинейном участке диаграммы нагружения, определяемые по формулам

$$\Delta \sigma = \frac{\Delta P}{A}, \qquad \Delta \varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0} \tag{4.11}$$

где Δ*P*, Δ*l* – приращение нагрузки и увеличение длины рабочей части образца по показаниям экстензометра на прямолинейном участке диаграммы нагружения;

А – площадь поперечного сечения образца;

*l*<sub>0</sub> – длина рабочей части образца (измерительная база экстензометра).

Предел прочности при растяжении определялся по формуле

$$\sigma_B = \frac{P_{\max}}{A}, \qquad (4.12)$$

где  $P_{\text{max}}$  – максимальная нагрузка, предшествующая разрушению образца.

Коэффициент Пуассона определялся по результатам совместного измерения продольных деформаций и поперечных деформаций, измеренных по ширине образца

$$v = \frac{\Delta \varepsilon}{\Delta \varepsilon_2}, \qquad (4.13)$$

где  $\Delta \epsilon_2$  – приращение относительных поперечных деформаций.

Результаты испытаний по определению характеристик механических свойств исследуемых материалов представлены в таблице 4.4.

Таблица 4.4 – Характеристики механических свойств материалов фитинга и трубы	Таблица 4.4 –	- Характеристики	механических	свойств	материалов	фитинга и	трубы
--	---------------	------------------	--------------	---------	------------	-----------	-------

Характеристика	Материал фитинга	Материал силового каркаса
Модуль упругости, МПа	60475	60871
Коэффициент Пуассона	0,086	0,08
Предел прочности при растя- жении, МПа	655	803

По этим характеристикам из библиотеки материалов приняты материалы со значениями модуля Юнга  $E_x$  и коэффициента Пуассона  $v_{xy}$ , наиболее близко соответствующими полученным экспериментальным данным.

Находясь в условиях неопределенности относительно прочности композитного материала на смятие, определим по литературным данным [58, 86, 151] возможные значения предела прочности на смятие для аналогичных материалов. Примем максимальное значение 600 МПа. Прочность клеевого слоя по экспериментальным данным СибГУ им. М.Ф. Решетнева составляет  $\sigma_{glue_{cr}} = 12$  МПа.

Применительно к рассматриваемой конструкции вычислительная модель неповрежденной конструкции включает в себя базовые разрешающие уравнения и алгоритм метода конечных элементов в перемещениях (подраздел 2.2) [14], а также нелинейные процедуры решения трехмерной контактной задачи теории упругости с переменной зоной контакта с трением [241]. Формулировка численной (конечно-элементной) модели узла сочленения включает в себя два шага нагружения. На первом шаге задается предварительное натяжение болтов и определяется начальное (собственное) напряженное состояние механической системы. На втором реализуется итерационный алгоритм решения нелинейной контактной задачи.

Граничные условия включают в себя жесткие закрепления, условия симметрии и осевую растягивающую силу (рисунок 4.11).



Рисунок 4.11 – Граничные условия

Численная модель (рисунок 4.12) разработана для узла сочленения со следующими физико-техническими параметрами. Свойства материалов: гайка, болт, обойма – углеродистая сталь с модулем Юнга E = 210000 МПа, коэффициентом Пуассона v = 0,3; фитинг – тканый полимерный композит:  $E_x = E_y = 61340$  МПа,  $E_z = 6900$  МПа,  $v_{xy} = 0,04$ ,  $v_{yz} = v_{xz} = 0,3$ ,  $G_{xy} = 19500$  МПа,  $G_{yz} = G_{xz} = 2700$  МПа; труба – однонаправленный полимерный композит:  $E_x = 60900$  МПа,  $E_y = 27000$  МПа,  $E_z = 15000$  МПа,  $v_{xy} = 0,07$ ,  $v_{yz} = 0,4$ ,  $v_{xz} = 0,27$ ,  $G_{xy} = G_{xz} = 4700$  МПа,  $G_{yz} = 3100$  МПа; коэффициент трения  $\mu = 0,15$ .



Рисунок 4.12 – Конечно-элементная модель: 1 – труба; 2 – фитинг

Исследуем разработанную логико-вычислительную модель при разных значениях действующих силовых факторов (усилия преднатяжения болтов  $F_0$  и растягивающие усилие в трубе  $F_{st}$ ). Верхняя граница интервала усилия преднатяжения болтов определялась их несущей способностью минимальным разрушающим усилием по ГОСТ Р 52627-2006 (ИСО 898-1:1999).

На первом этапе анализировалось влияние усилия преднапряжения болтов при отсутствии растягивающей силы на НДС деталей. В результате серии конечно-элементных расчетов

122

с варьированием усилия затяжки болтов построены зависимости максимумов эквивалентных напряжений в отдельных структурных элементах и связях от усилия затяжки, аппроксимированные линейными уравнениями (рисунок 4.13).



Рисунок 4.13 – Зависимость эквивалентных напряжений в структурных элементах от усилия затяжки болта: 1 – обойма; 2 – фитинг; 3 – труба; 4 – клеевой слой; 5 – минимальное разрушающее усилие (*F*<sub>0min</sub>) болта

Таким образом, на этом шаге установлено, что смятия композитных деталей не происходит, а обойма находится в упругой стадии деформирования во всем диапазоне усилий преднатяжения болтов.

Подставляя значения прочностных характеристик клеевого слоя в полученное уравнение (рисунок 4.13)  $12 = 0,0006 \cdot F_0$ , получим значение  $F_{01} = 20000$  H, при превышении которого, соответственно, инициируются процессы разрушения клеевого слоя в области преднапряженных болтов (рисунок 4.14, зона б).

Таким образом, на этом шаге определены условия

$$F_0 < F_{01}, \tag{4.14}$$

нарушение которых является триггерами сценария развития повреждений при действии только усилий преднатяжения болтов, то есть событиями, изменяющими состояние системы таким образом, что инициируются те или иные цепочки логико-вычислительной модели анализа живучести.



Рисунок 4.14 – Зоны повреждения клеевого слоя при *F*<sub>0</sub> ≥ *F*<sub>01</sub> = 20000 Н: 1 – труба; 2 – фитинг; а – клеевой слой; б – зона повреждения клеевого слоя преднатяженными болтами; в – зона повреждения клеевого слоя растягивающей силой

На втором этапе рассматривается возможность работы узла сочленения только за счет болтового соединения при отсутствии (полном разрушении) клеевого слоя. Оценка этой возможности осуществляется путем анализа существования решения (сходимости) нелинейной задачи. Интерпретируем отсутствие сходимости (решения) как бесконечные перемещения сочлененных деталей вследствие нарушения условия (4.3) при недостаточной затяжке болтов.

На рисунке 4.15 показана предельная зависимость усилия затяжки от силы растяжения  $F_0 = f(F_{st})$ , разделяющая области работоспособного и неработоспособного состояний болтового соединения.



Рисунок 4.15 – Предельная зависимость  $F_0 = f(F_{st})$ 

Далее, на третьем этапе, исследуем модель при одновременном варьировании величин  $F_0$ и  $F_{st}$ . При некоторых их соотношениях возникает ситуация, когда клеевой слой разрушен, и затяжка болтов не обеспечивает достаточной силы трения для фиксации трубы и фитинга. Это требует трансформации трехмерной геометрии модели, заключающейся в смещении трубы и фитинга в противоположные стороны относительно болтов на величину зазора. Далее выполняются вычислительные процедуры в соответствии с рисунком 4.7 до полной потери конструкционной целостности узла.

Результаты систематических расчетов, выраженные в виде расчетных зависимостей напряжений в деталях от величин *F*<sub>0</sub> и *F*<sub>st</sub> представлены на рисунках 4.16-4.21.



Рисунок 4.16 – Расчетные зависимости напряжений от растягивающей силы  $F_{st}$  при усилии затяжки болтов  $F_0 = 2000$  Н



Рисунок 4.17 – Расчетные зависимости напряжений от растягивающей силы  $F_{st}$  при усилии затяжки болтов  $F_0 = 6000$  Н



Рисунок 4.18 – Расчетные зависимости напряжений от растягивающей силы  $F_{st}$  при усилии затяжки болтов  $F_0 = 10000$  Н



Рисунок 4.19 – Расчетные зависимости напряжений от растягивающей силы  $F_{st}$  при усилии затяжки болтов  $F_0 = 14000$  Н



Рисунок 4.20 – Расчетные зависимости напряжений от растягивающей силы  $F_{st}$  при усилии затяжки болтов  $F_0 = 18000$  Н



Рисунок 4.21 – Расчетные зависимости напряжений от растягивающей силы  $F_{st}$  при усилии затяжки болтов  $F_0 = 22000$  Н

По полученным зависимостям возможно для конкретных сочетаний  $F_0$  и  $F_{st}$  определить фактически реализующийся сценарий и получить соответствующие оценки живучести. Результат такого анализа выглядит следующим образом.

При  $F_0$  = 2000 H и  $F_{st}$  < 5400 H повреждений не возникает и оценка живучести не выполняется. При  $F_0$  = 2000 H и 5400 H  $\leq F_{st}$  < 5670 H реализуется четвертый сценарий накопления повреждений, при котором конструкционная целостность обеспечена при наличии единичного

повреждения. Этот сценарий соответствует первому варианту исхода (раздел 4.1), соответственно ранг живучести составляет 1. При  $F_0 = 2000$  H и  $F_{st} \ge 5670$  реализуется пятый сценарий, при котором конструкционная целостность нарушается при наличии двух повреждений, что соответствует второму варианту исхода, следовательно, ранг живучести составляет 0,5.

При  $F_0 = 6000$  H и  $F_{st} < 5400$  H повреждений не возникает и оценка живучести не выполняется. При  $F_0 = 2000$  H и 5400 H  $\leq F_{st} < 5780$  H реализуется четвертый сценарий накопления повреждений, при котором конструкционная целостность обеспечена при наличии единичного повреждения. Этот сценарий соответствует первому варианту исхода (раздел 4.1), соответственно ранг живучести составляет 1. При  $F_0 = 2000$  H и  $F_{st} \geq 5780$  H реализуется пятый сценарий, при котором конструкционная целостность нарушается при наличии двух повреждений, что соответствует второму варианту исхода, следовательно, ранг живучести составляет 0,5.

При  $F_0 = 10000$  H и  $F_{st} < 5400$  H повреждений не возникает и оценка живучести не выполняется. При  $F_0=10000$  H и 5400 H  $\leq F_{st} < 6000$  H реализуется четвертый сценарий накопления повреждений, при котором конструкционная целостность обеспечена при наличии единичного повреждения. Этот сценарий соответствует первому варианту исхода (раздел 4.1), соответственно ранг живучести составляет 1. При  $F_0 = 10000$  H и 6000 H  $\leq F_{st} < 7000$  H реализуется тринадцатый сценарий, при котором конструкционная целостность обеспечена при наличии двух повреждений, что соответствует первому варианту исхода, следовательно, ранг живучести составляет 1. При  $F_0=10000$  H и  $F_{st} \geq 7000$  H реализуется восемнадцатый сценарий, при котором конструкционная целостность нарушается при наличии трех повреждений, что соответствует второму варианту исхода, следовательно, ранг живучести составляет 0,5.

При  $F_0 = 14000$  H и  $F_{st} < 5400$  H повреждений не возникает и оценка живучести не выполняется. При  $F_0 = 14000$  H и 5400 H  $\leq F_{st} < 7000$  H реализуется четвертый сценарий накопления повреждений, при котором конструкционная целостность обеспечена при наличии единичного повреждения. Этот сценарий соответствует первому варианту исхода (раздел 4.1), соответственно ранг живучести составляет 1. При  $F_0 = 14000$  H и 7000 H  $\leq F_{st} < 9500$  H реализуется тринадцатый сценарий, при котором конструкционная целостность обеспечена при наличии двух повреждений, что соответствует первому варианту исхода, следовательно, ранг живучести составляет 1. При  $F_0 = 14000$  H и  $F_{st} \geq 9500$  H реализуется восемнадцатый сценарий, при котором конструкционная целостность нарушается при наличии трех повреждений, что соответствует второму варианту исхода, следовательно, ранг живучести составляет 0,5.

При  $F_0 = 18000$  H и  $F_{st} < 5400$  H повреждений не возникает и оценка живучести не выполняется. При  $F_0 = 18000$  H и 5400 H  $\leq F_{st} < 7000$  H реализуется четвертый сценарий накопления повреждений, при котором конструкционная целостность обеспечена при наличии единичного повреждения. Этот сценарий соответствует первому варианту исхода (раздел 4.1), соответственно ранг живучести составляет 1. При  $F_0 = 18000$  H и 7000 H  $\leq F_{st} < 10500$  H реализуется тринадцатый сценарий, при котором конструкционная целостность обеспечена при наличии двух повреждений, что соответствует первому варианту исхода, следовательно, ранг живучести составляет 1. При  $F_0 = 18000$  H и  $F_{st} \geq 10500$  H реализуется восемнадцатый сценарий, при котором конструкционная целостность нарушается при наличии трех повреждений, что соответствует ствует второму варианту исхода, следовательно, ранг живучести составляет 0,5.

При  $F_0 = 22000$  H и  $F_{st} < 1000$  H повреждений не возникает и оценка живучести не выполняется. При  $F_0= 22000$  H и 1000 H  $\leq F_{st} < 6500$  H реализуется четвертый сценарий накопления повреждений, при котором конструкционная целостность обеспечена при наличии единичного повреждения. Этот сценарий соответствует первому варианту исхода (раздел 4.1), соответственно ранг живучести составляет 1. При  $F_0 = 22000$  H и 6500 H  $\leq F_{st} < 7750$  H реализуется тринадцатый сценарий, при котором конструкционная целостность обеспечена при наличии двух повреждений, что соответствует первому варианту исхода, следовательно, ранг живучести составляет 1. При  $F_0 = 22000$  H и  $F_{st} \geq 7750$  H реализуется восемнадцатый сценарий, при котором конструкционная целостность нарушается при наличии трех повреждений, что соответствует второму варианту исхода, следовательно, ранг живучести составляет 0,5.

По результатам выполненного анализа построена диаграмма областей расчетных рангов живучести (рисунок 4.22), определяющая совокупности пар значений  $F_0$  и  $F_{st}$  приводящих к сценарию с тем или иным рангом живучести. Это позволяет обосновать выбор таких сочетаний  $F_0$  и  $F_{st}$ , при которых конструкционная целостность узла будет обеспечена при любых сценариях накопления повреждений.



Рисунок 4.22 – Области расчетных рангов живучести

Таким образом, предложен и апробирован методический подход к построению и анализу живучести структурно-сложных конструкций узлов сочленения. Он заключается в разработке и использовании структурной и модели взаимодействия элементов узла сочленения на основе которых разрабатывается сценарий многоуровневого процесса накопления повреждений. Исследование модели живучести с использованием аналитических, численных, экспертных методов позволяет описать все возможные состояния конструкции в течение жизненного цикла с последующей оценкой соответствующих рисков.

Систематическое исследование вычислительной модели анализа живучести позволяет определить все возможные состояния поврежденности конструкции и соответствующие им комбинации условий и внешних силовых факторов.

Апробация подхода на примере узла сочленения стержней каркаса крупногабаритного прецизионного рефлектора зеркальной антенны позволила установить критические значения внутренних и внешних воздействий (усилия преднатяжения болтов и растягивающих сил в стержнях каркаса), соответствующие реализации разных вариантов развития повреждений.

Итак, в рамках одной методики в целях анализа конструкционной живучести впервые интегрированы все необходимые модели и вычислительные технологии, позволяющие получить достаточно полное представление обо всех возможных состояниях поврежденности структурно-сложной конструкции и количественные оценки уровня их работоспособности в этих состояниях.

Неизбежным недостатком рассматриваемого подхода является необходимость проведения большого количества вычислительных экспериментов, которое резко возрастает при увеличении структурной сложности конструкции (росте количества структурных элементов, многообразия механических взаимодействий и, соответственно, числа сценариев накопления повреждений). Однако при разработке уникальных высокоответственных технических объектов такие затраты оправданы и даже необходимы. В настоящее время представляется необходимым осуществление декомпозиции структурно-сложных конструкций с целью вычленения ограниченного числа подсистем, подвергаемых анализу живучести в соответствии с предложенной методикой.

#### 4.5 Результаты и выводы по разделу 4

Определено понятие живучести повреждаемого узла сочленения стержневых элементов как его свойство сохранять конструкционную целостность для обеспечения согласованного деформирования стержневых элементов и неразрывности силового потока между ними. Критерием живучести считаем сохранение конструкционной целостности узла на множестве возможных сценариев накопления повреждений и разрушений.

Введены ранговые показатели живучести узлов сочленения, принимающие значения 1 (живучесть обеспечена при наличии последовательности повреждений), 0,5 (живучесть обеспечена как минимум при одном повреждении), 0 (живучесть не обеспечена при единственном повреждении). Получение ранговых показателей осуществляется на множестве всех потенциально возможных сценариев накопления повреждений узла и включает определение как индивидуальных рангов для каждого из возможных сценариев, так и потенциального, системно обусловленного ранга живучести, учитывающего все возможные исходы сценариев накопления повреждений.

Предложена методика оценки живучести узлов сочленения, включающая в себя построение моделей структуры узла и возможных взаимодействий входящих в него элементов, анализ возможных предельных состояний и условий нарушения работоспособности, разработку логико-вычислительной модели поведения повреждаемого узла для исследования различных сценариев накопления повреждений с последующим определением рангов живучести.

Исследована живучесть типового узла сочленения стержневых элементов силового каркаса крупногабаритного рефлектора зеркальной антенны наземных систем спутниковой связи: значение потенциального ранга живучести составляет 0,66, тогда как ранги живучести на рассмотренном множестве сценариев накопления повреждения составили 0,5-1,0 в зависимости от величин и соотношения усилия преднатяжения болтов и растягивающей силы в силовом стержневом элементе.

#### Основные выводы

1. В качестве критериев структурной живучести предложены соотношения между текущими и критическими значениями напряжений (для силовых), собственных частот свободных колебаний (для колебательных), формостабильности (для прецизионных) конструкций при повреждении их структуры (разрушении структурных элементов и (или) связей между ними).

2. Для количественной оценки структурной живучести стержневых конструкций предложены показатели, характеризующие зависимости функциональных характеристик (характеристик динамических напряжений для силовых, собственных частот свободных колебаний для колебательных, параметров формостабильности для прецизионных конструкций) от степени поврежденности структуры (количества разрушенных структурных элементов) на множестве сценариев накопления повреждений.

3. Для оценки живучести структурно-сложных узлов сочленения стержневых элементов, характеризующихся значительным числом сценариев накопления повреждений, предложены ранговые показатели живучести, принимающие для каждого сценария значения 1 (конструкционная целостность обеспечена при наличии последовательности повреждений), 0,5 (конструкционная целостность обеспечена при единственном повреждении), или 0 (конструкционная целостность не обеспечена при единственном повреждении). Конструктивное решение узла сочленения характеризуется потенциальным, системно обусловленным рангом живучести, определяемым на множестве всех возможных сценариев накопления повреждений и разрушения.

4. Разработаны методики количественного анализа живучести повреждаемых стержневых конструкций, основанные на расчетно-экспериментальных исследованиях сценариев накопления повреждений. Определение сценариев осуществляется путем экспертного оценивания результатов анализа НДС на каждом шаге последовательного разрушения конструкции с учетом возможных повреждений структурных элементов, или выбора групп структурных элементов для удаления из расчетной схемы.

5. С использованием результатов экспериментального исследования повреждений структурных элементов узла сочленения силового каркаса рефлектора разработана логиковычислительная модель анализа накопления повреждений и живучести узла. Значение потенциального ранга живучести на множестве рассматриваемых сценариев составляет 0,66. Определены соотношения усилий преднатяжения болтов и растягивающих сил в стержневых элементах каркаса, предотвращающие возникновение сценариев повреждения, характеризующихся низкими показателями живучести.

6. Апробация критериев, показателей и методик оценки живучести выполнена при исследовании поведения ряда типовых стержневых конструкций для следующих сценариев: сило-

132

вые конструкции контейнера – 6 сценариев, мачты – 1 сценарий, колебательная система бака высокого давления электрореактивного двигателя космического аппарата – 2 сценария, силовой каркас прецизионного рефлектора – 3 сценария, узел сочленения стержней силового каркаса – 18 сценариев. Для стержневых конструкций колебательной системы бака высокого давления электрореактивного двигателя космического аппарата и силового каркаса прецизионного рефлектора на рассматриваемом множестве сценариев установлены условия нарушения критериев живучести.

#### СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

БВМСУА – базовая вычислительная модель статического упругого анализа;

ВМКВ – вычислительная модель контактного взаимодействия;

ВМПУ – вычислительная модель потери устойчивости;

КМ – композитные материалы;

НДС – напряженно-деформированное состояние;

РСЭ – рождение и смерть элемента;

с.к.о. - среднеквадратическое отклонение;

СКК – силовая конструкция корпуса;

[А] – матрица коэффициентов жесткости (матрица жесткости материала);

[В] – матрица деформаций;

[С] – матрица демпфирования конечно-элементной модели;

 $[C_k]$  – матрица демпфирования *k*-го элемента;

[С<sub>ζ</sub>] – матрица демпфирования, зависящая от частоты;

[D] – матрица дифференцирования;

[К] – глобальная матрица жесткости конечно-элементной модели;

[k] – матрица жесткости конечных элементов;

 $[K_{i}^{T}]$  –касательная матрица жесткости;

 $[K_{\Gamma}]$  – геометрическая матрица жесткости (матрица, учитывающая изменение изгибной жесткости стержня в зависимости от величины продольной силы);

[*M*] – матрица масс конечно-элементной модели;

 ${E}$  – множество параметров жесткости применяемых конструкционных материалов;

 ${F(t)}$  – вектор узловых сил в функции времени *t*;

 $\{F^*\}$  – вектор заданных значений объемной нагрузки;

 $\{F\}$  – вектор обобщенных узловых усилий, статически эквивалентных действию внешних нагрузок;

 ${F_{i}^{nr}}$  – вектор восстанавливающих сил, равных и направленных противоположно внутренним силам в элементах и восстанавливающих состояние равновесия;

 $\{p^*\}$  – вектор заданных значений поверхностной нагрузки;

 ${u(t)}$  – вектор перемещений в функции времени *t*;

 $\{u'(t)\}$  – вектор скоростей в функции времени *t*;

{*u''(t)*} – вектор узловых ускорений в функции времени *t*;

{*u*},{*бu*} – векторы перемещений узлов конечно-элементной системы и их вариаций;

 $\{\delta u\}$  – вектор вариации перемещений;

{ $\delta \varepsilon$ } – вектор вариации деформаций;

{ σ } – вектор напряжений;

 $\{\varphi_i\}$  – собственный вектор, определяющий форму колебаний *i*-й моды;

{ψ} – форма потери устойчивости;

 $||s_0||, ||s_d||$  – нормы вектора перемещений неповрежденной и поврежденной конструкции;

Δ*l* – увеличение длины рабочей части образца по показаниям экстензометра на прямолинейном участке диаграммы нагружения;

 $\Delta t$  – шаг интегрирования;

Δε – приращение относительных продольных деформаций на прямолинейном участке диаграммы нагружения;

 $\Delta \varepsilon_2$  – приращение относительных поперечных деформаций;

 $\Delta P$  – приращение нагрузки на прямолинейном участке диаграммы нагружения;

Δσ – приращение напряжений на прямолинейном участке диаграммы нагружения;

А – площадь поперечного сечения образца;

*А<sup>k</sup>* – площадь контактного взаимодействия деталей;

*А<sub>n</sub>* – площадь сечения нетто элемента конструкции;

*d* – степень поврежденности, носящая дискретный или непрерывный характер в зависимости от физико-технической природы повреждения;

*d*(*r*) – квадрат отклонения отражающей поверхности от поверхности *S* идеального параболоида;

detK<sub>i</sub>, detK<sub>0</sub> – детерминанты матриц жесткости поврежденной и неповрежденной конструкции;

*DSR* – детерминированные индексы живучести;

Е – модуль упругости 1-го рода;

*E<sub>j</sub>* – энергия, высвобождаемая при повреждении *j*-го конструктивного элемента и направленная на повреждение *k*-го конструктивного элемента;

*Е*<sub>*k*</sub> – энергия, необходимая для повреждения *k*-го конструктивного элемента;

*F* – критическая сила потери устойчивости;

*f*-частота колебаний;

 $F_0^{calc}$  – расчетное (проектное) усилие затяжки болта.

 $F_0^{real}$  – реальное (фактическое) усилие затяжки болта;

f<sub>1</sub> – низшая собственная частота свободных колебаний;

 $f_{10}, f_{i0}$  – собственные частоты колебаний неповрежденной конструкции;

 $f_{1i}, f_{ii}$  – собственные частоты колебаний при возникновении *j*-го дефекта (повреждения);

 $F_{st}$  – сила растяжения;

 $f_y$  – условие текучести (пластичности);

*G* – модуль упругости 2-го рода;

G(t) - функция живучести;

 $g_k(t)$  – мера живучести;

 $G_s$  – системная характеристика;

 $G_{np, \ \kappa oc}$  – индекс живучести, основанный на соотношении рисков прямых и косвенных ущербов;

*h*(*d*) – функции, определяемые расчетными или экспериментальными методами;

*h*<sub>t</sub> – толщина образцов, вырезанных из фитинга и трубы узла сочленения;

*h<sub>x</sub>*, *h<sub>y</sub>* – координаты рассматриваемой точки сечения относительно осей;

*I* – индекс живучести, основанный на надежности в связи со статическим рассеянием несущей способности;

 $I_{RC}$  – индекс живучести;

*I<sub>ROB</sub>* – живучесть на базе показателей риска;

 $J_{xn}, J_{yn}$  – моменты инерции сечения относительно осей;

k – показатель живучести, характеризующий глубину сценария накопления поврежде-

ний;

*k*<sub>*a*</sub> – коэффициент, зависящий от формы сечения;

*k*<sub>*i*</sub> – весовой коэффициент для *i*-й группы элементов;

*К*<sub>*s*</sub> – количественный показатель живучести;

 $K_{ss}$  – количество возможных сценариев;

 $k_{\lambda}$  – коэффициент, характеризующий порядок отклонения (в долях от  $\lambda_r$ );

*l* – длина стержня;

*l*<sub>0</sub> – длина рабочей части образца (измерительная база экстензометра);

*LF*<sub>1</sub> – нагрузка, при которой разрушается первый конструктивный элемент;

*LF*<sub>d</sub> – нагрузка, разрушающая поврежденную конструкцию;

*LF<sub>f</sub>* – нагрузка, при которой нарушаются функциональные характеристика конструкции;

 $LF_u$  – нагрузка, разрушающая неповрежденную конструкцию;

*m*<sub>d</sub> – количество сценариев, в которых имеют место прямые ущербы и риски, обусловленные локальными повреждениями системы (общее количество сценариев);

 $M_x, M_y$  – изгибающие моменты;

*n* – коэффициент запаса;

*N* – число конечных элементов в системе;

*n<sub>d</sub>* – количество сценариев, в которых имеют место прямые ущербы и риски, связанные с отказами системы в целом;

N<sub>ele</sub> – число элементов, имеющих собственную матрицу демпфирования;

*n<sub>i</sub>* – количество поврежденных элементов в *i*-й группе;

*N<sub>i</sub>* – общее количество конструктивных элементов *i*-той группы;

N<sub>ja</sub> – количество узлов сетки на поверхности зеркала при ее дискретизации;

*Р* – нормальное контактное давление;

*P*<sub>d</sub> – максимальный дополнительный прирост повреждения;

 $P_k(t)$  – вероятность реализации *k*-го сценария;

*P*<sub>lim</sub> – приемлемый прирост повреждения;

*P<sub>max</sub>* – максимальная нагрузка, предшествующая разрушению образца;

*R* – работа внешних сил (линейный функционал от компонент перемещений);

*r*<sub>a</sub> – радиус-векторы точек отражающей поверхности;

*R*<sub>d</sub> – показатель живучести в форме коэффициентов запаса для поврежденной конструкции;

*R<sub>di</sub>* – детерминированный показатель живучести учитывающий интенсивность развития повреждений после первоначального повреждения;

*R*<sub>dir</sub> – величина прямого (вызванного первоначальным повреждением) риска;

*R<sub>e</sub>* – детерминированный показатель живучести учитывающий энергетические характеристики разрушения;

 $R_{f (dmag)}$  – вероятность отказа системы;

 $R_{f (sys)}$  – вероятность повреждения (отказа первого конструкционного элемента);

*R*<sub>f</sub> – показателей живучести в форме коэффициентов запаса, при которой нарушаются функциональные характеристика конструкции;

 $R_g$  – полученное повреждение;

*RI* – вероятностной индекс избыточности;

*RIF* – детерминированные индексы живучести;

*R<sub>ind</sub>* – величина непрямого (вызванного дальнейшей эскалацией разрушения вследствие первоначального повреждения) риска;

*R<sub>max</sub>* – максимально возможное повреждение (связность), при котором еще сохраняется конструкционная целостность;

*r*<sub>s</sub> – индекс прочностной избыточности;

*R<sub>s</sub>* – системная живучесть как характеристика нечувствительности к неблагоприятным факторам;

 $R_{sd}$  – индексы живучести в терминах жесткости (перемещений);

*R*<sub>u</sub> – показателей живучести в форме коэффициентов запаса для неповрежденной кон-

струкции;

 $R_y$  – расчетное сопротивление стали растяжению, сжатию, изгибу по пределу текучести;  $R_{\kappa o c}$  – косвенные риски;

 $R_{np}$  – прямые риски;

*R*, *F* – средние значения (матожидания) несущей способности и нагрузки;

s, r, t – координаты точки в локальной системе координат конечного элемента;

 $S_{R}^{2}$ ,  $S_{F}^{2}$  – дисперсии несущей способности и нагрузки;

*S<sup>a</sup>* – абсолютные показатели живучести;

*S*<sup>*r*</sup> – относительные показатели живучести;

 $s_u$  – предел прочности;

 $s_X$  – чувствительность к возмущающему событию X;

 $s_v$  – предел текучести;

t – момент времени;

и, v, w – смещения произвольной точки конечного элемента в направлении осей x, y, z;

*u<sub>i</sub>* – суммарное (по осям декартовой системы координат) поступательное перемещение *i*-го узла сетки;

*u<sub>I</sub>*, *u<sub>J</sub>*, ..., *v<sub>I</sub>*, *v<sub>J</sub>*, ...,*w<sub>I</sub>*, *w<sub>J</sub>*, ...- смещения узлов *I*, *J*, ... в направлении осей *x*, *y*, *z*;

 $u_a$  – суммарное поступательное перемещение, усредненное по N узлам сетки;

*V* – потенциальная энергия деформации (квадратичный функционал от компонент деформаций);

*v*<sub>d</sub> – величина проектной нагрузки;

 $V_n$  – объем *n*-го конечного элемента;

*v<sub>r</sub>* – предельная несущая способность поврежденной конструкции;

*v*<sub>*u*</sub> – предельная несущая способность неповрежденной конструкции;

*X<sub>ve</sub>* – вектор собственной формы;

 $X_s$  – возмущающее событие;

*Z* – потенциальный ранг живучести;

α – коэффициент пропорциональности массы в модели пропорционального демпфирования Рэлея;

 β – коэффициент пропорциональности жесткости в модели пропорционального демпфирования Рэлея;

β<sub>c</sub> – переменный множитель к матрице жесткости;

β<sub>int</sub>, β<sub>d</sub> – индексы надежности неповрежденной и поврежденной конструкции;

 $\beta_i$  – постоянный множитель к матрице жесткости [ $K_i$ ] *j*-го материала;

*γ<sub>c</sub>* – коэффициент условий работы;

γ<sub>V</sub> – вес единицы объема материала;

*γ<sub>c</sub>* – коэффициент условий работы;

δ-с.к.о. поверхности зеркала;

*δ<sub>mod</sub>* – логарифмический декремент колебаний;

 $\delta \Phi_{\varepsilon}$  – функционал Лагранжа;

δЭ<sub>1</sub> – работа внутренних сил на возможных перемещениях, или вариация удельной энергии деформации;

ε-деформация;

ε<sup>*c*</sup><sub>*n*</sub> – статические деформации до разрушения стержневого элемента по результатам статического расчета;

ε<sup>*c*</sup><sub>*n*-1</sub> – статические деформации в момент разрушения стержневого элемента по результатам статического расчета;

 $\epsilon^{d}_{n-1}$  – динамические деформации в момент разрушения стержневого элемента по результатам статического расчета;

ζ – степень демпфирования;

 $\theta_x, \theta_y, \theta_z$  – повороты узлов *I*, *J*, ... относительно осей *x*, *y*, *z*;

λ – безразмерный множитель (коэффициент, на который необходимо умножить нагрузку,
 чтобы возникла потеря устойчивости);

λ<sub>cr</sub> – минимальная нагрузка конструктивной системы, при которой возникают локальные повреждения или прогрессирующее разрушение в случае внезапного удаления одного конструктивного элемента;

λ<sub>pl</sub> – пластический множитель;

 $\lambda_{\kappa p}$  – критическое значение параметра нагрузки ;

 $\mu(t)$  – плавность изменения несущей способности;

µ*d* – коэффициент трения скольжения;

 $\mu_s$  – коэффициент трения покоя;

σ-нормальное напряжение;

ς – плотность материала;

 $\sigma_b^{f}$  – временное сопротивление разрушению материала фитинга;

 $\sigma_b^{\ p}$  – временное сопротивление разрушению материала трубы;

σ<sub>b</sub><sup>s</sup> – временное сопротивление разрушению материала обоймы;

 $\sigma_n^c$  – статические напряжения до разрушения стержневого элемента по результатам статического расчета;

σ<sup>*c*</sup><sub>*n*-1</sub> – статические напряжения в момент разрушения стержневого элемента по результатам статического расчета; σ<sup>*d*</sup><sub>*n*-1</sub> – динамические напряжения в момент разрушения стержневого элемента по результатам статического расчета;

 $\sigma^{d}_{T}$  – напряжения в результате численного анализа переходных процессов;

 $\sigma_e$  – эквивалентные напряжения;

 $\sigma^{t}$  – максимальные эквивалентные напряжения в фитинге;

 $\sigma_{cr}^{t}, \sigma_{cr}^{s}, \sigma_{cr}^{p}$  – соответственно прочность на смятие фитинга, обоймы, трубы.

 $\sigma_{glue}$  – эквивалентные напряжения в клеевом слое;

σ<sub>gluecr</sub> − прочность клеевого слоя;

 $\sigma^{p}$  – максимальные эквивалентные напряжения в трубе;

 $\sigma^{s}$  – максимальные эквивалентные напряжения в обойме;

 $\sigma_x$  – напряжения вдоль оси *x*;

 $\sigma_y$  – напряжения вдоль оси *y*;

 $\sigma_{\nu}(\xi)$  – монотонно возрастающая функция параметра упрочнения  $\xi$ ;

 $\sigma_{z}$  – напряжения вдоль оси *z*;

 $\sigma_B$  – предел прочности при растяжении;

 $\sigma^{c}_{pacy}$  – расчетные напряжения в результате статического анализа НДС;

 $\tau$  – касательное напряжение;

τ<sub>1</sub>,τ<sub>2</sub> – касательные напряжения в двух взаимно перпендикулярных направлениях;

 $\tau^b$  – максимальное касательное напряжение в сечении болта;

 $\tau^{b}_{cut}$  – предел прочности материала болта на срез;

 $\tau_{lim}$  – предельное касательное напряжение трения;

 $\tau_{xy}$  – касательное напряжение, действующее на площадке, перпендикулярной оси *x* и направленное вдоль оси *y*;

 $\tau_{yz}$  – касательное напряжение, действующее на площадке, перпендикулярной оси *у* и направленное вдоль оси *z*;

 $\tau_{zx}$  – касательное напряжение, действующее на площадке, перпендикулярной оси *z* и направленное вдоль оси *x*;

 $\varphi_l(x)$  – система аппроксимирующих функций конечных элементов (функции формы, координатные функции);

 $\omega_i$  – собственная частота моды;

а – длина образца;

Ф – потенциальная энергия.

#### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- Аварии техники и сооружений на Севере: сб. науч. тр. Якутск: Изд-во ЯГУ, 1993. 51 с.
- 2. Азжеуров, О.В. Развитие теории конструктивной безопасности и живучести конструктивных систем / О.В. Азжеуров // Вестник МГСУ. 2011. № 3. С. 209-212.
- Азжеуров, О.В. Совершенствование методических подходов по расчету конструктивных систем на живучесть при внезапных запроектных воздействиях / О.В. Азжеуров // Промышленное и гражданское строительство. – 2012. – № 5. – С. 36-38.
- 4. Аксютин, Л.Р. Аварии судов от потери устойчивости / Л.Р. Аксютин, С.Н. Благовещенский. – Л.: Судостроение, 1975. – 200 с.
- Алексеевский, Г.В. Буровые установки Уралмашзавода / Г.В. Алексеевский. М.: Недра, 1981. – 528 с.
- 6. Алмазов, В.О. Проблемы сопротивления зданий прогрессирующему разрушению / В.О. Алмазов, А.И. Плотников, Б.С. Расторгуев // Вестник МГСУ. 2011. № 2. С. 15-20.
- Алмазов, В.О. Проектирование сооружений с учетом аварийных воздействий / В.О. Алмазов // Вестник МГСУ. – 2010. – № 1. – С. 151-159.
- Андреев, П.В. Исследование разрушения космических ядерных энергетических установок в аварийных ситуациях и обоснование систем и средств обеспечения безопасности / П.В. Андреев, В.С. Васильковский, В.В. Кашелкин, Н.А. Соколов, Е.М. Страхов, М.Ю. Федоров // Известия Алтайского госуниверситета. 2014. № 1-1. С. 137-139.
- Арепьев, А.Н. Вопросы эксплуатационной живучести авиаконструкций / А.Н. Арепьев, М.С. Громов, В.С. Шапкин. – М.: Воздушный транспорт, 2002. – 424 с.
- Аугустин, Я. Аварии стальных конструкций / Я. Аугустин, Е. Шледзевский. М.: Стройиздат, 1978. – 176 с.
- Ачеркан, Н.С. Детали машин. Расчёт и конструирование. Справочник в трёх томах. Т.1. / Н.С. Ачеркан. – М.: Машиностроение, 1968. – 442 с.
- 12. Баграмов, Р.А. Буровые машины и комплексы / Р.А. Баграмов. М.: Недра, 1988. 501 с.
- Баничук, Н.В. Механика больших космических конструкций / Н.В. Баничук, Н.И. Карпов, Д.М. Климов и др. – М.: Факториал, 1997. – 302 с.
- 14. Бате, К.Ю. Методы конечных элементов / К.Ю. Бате. М: ФИЗМАТЛИТ, 2010 г. 1024 с.
- 15. Беглов, Б.В. Мостовые перегружатели / Б.В. Беглов. М.: Машиностроение, 1974. 224 с.

- Беленя, Е.И. Металлические конструкции. Общий курс. Учебник для вузов / Е.И. Беленя,
  В.А. Балдин, Г.С. Ведеников и др.; под общ. ред. Е.И. Беленя. 6-е изд., перераб. и допол. М.: Стройиздат, 1986. 560 с.
- Белостоцкий, А.М. Расчетное обоснование механической безопасности стадионов к Чемпионату мира по футболу 2018 года / А.М. Белостоцкий, П.А. Акимов, А.А. Аул, Д.С. Дмитриев, Ю.Н. Дядченко, А.И. Нагибович, К.И. Островский, А.С. Павлов // International Journal for Computational Civil and Structural Engineering. – 2018. – 14. – № 1. –С. 14-25.
- Беляев, Б.И. Причины аварий стальных конструкций и способы их устранения / Б.И. Беляев, В.С. Корниенко. М.: Стройиздат, 1968. 208 с.
- Бержинский, Ю.А. Резервы живучести безригельного каркаса при запроектных воздействиях / Ю.А. Бержинский, Л.П. Бержинская // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. – 2013. – № 3. – С. 31-35.
- 20. Беркман, И.Л. Универсальные одноковшовые строительные экскаваторы. Учебник для проф.-техн. училищ / И.Л. Беркман. М.: Высшая школа, 1977. 384 с.
- 21. Беркутов, С.В. Исследование прочности и живучести несущих конструкций телекоммуникационного контейнера / С.В. Беркутов, В.В. Азингареев, Ю.Ф. Буйницкая // Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета имени академика М.Ф. Решетнева. – 2011. – № 7. – С. 76-80.
- 22. Биргер, И.А. Расчет на прочность деталей машин. / И.А. Биргер, Б.Ф. Шорр, Г.Б. Иосилевич. М.: Машиностроение, 1993. 640 с.
- 23. Биргер, И.А. Резьбовые и фланцевые соединения / И.А. Биргер, Г.Б. Иосилевич. М.: Машиностроение, 1990. –368 с.
- 24. Бобриков, Б.В. Строительство мостов / Б.В. Бобриков. М.: Транспорт, 1978. 296 с.
- 25. Бондаренко, Д.Л. Анализ существующих подходов к трактовке понятия «живучесть» информационно-управляющей подсистемы АСУ специального назначения / Д.Л. Бондаренко, И.Л. Жбанов // Актуальные вопросы современной науки. 2016. № 45. С. 100-104.
- 26. Боровская, Я.С. К определению усилий среза в болтах многорядных металлокомпозитных стыков / Я.С. Боровская, В.И. Гришин, Д.В. Попов // Ученые записки ЦАГИ. – 2010. – Т. XLI. – № 6. – С. 72-79.
- 27. Бритаев, В.А. Горные машины и комплексы. Учебное пособие для техникумов / В.А. Бритаев, В.Ф. Замышляев. М.: Недра, 1984. 288 с.
- Броверман, Г.Б. Строительство мачтовых и башенных сооружений / Г.Б. Броверман. М.: Стройиздат, 1984. – 256 с.

- 29. Буйницкая, Ю.Ф. Анализ конструктивных решений узлов сочленения элементов стержневых систем /Ю.Ф. Буйницкая // Труды VI Евразийского симпозиума по проблемам прочности материалов и машин для регионов холодного климата: Т. 2. Материалы. Якутск, 24-29 июня 2013 г. – Якутск: Ахсаан, 2013. – С. 130-134.
- 30. Буйницкая, Ю.Ф. Анализ причин аварий мачтовых металлоконструкций / Ю.Ф. Буйницкая // XII Всероссийская конференция молодых ученых по математическому моделированию и информационным технологиям. – Новосибирск: ИВТ СО РАН, 2011. – С. 51.
- 31. Буйницкая, Ю.Ф. Влияние повреждения узла сочленения на деформирование стержневой системы /Ю.Ф. Буйницкая, С.В. Доронин // V Международная конференция «Деформация и разрушение материалов и наноматериалов». Москва. 26-29 ноября 2013 г. / Сборник материалов. М.: ИМЕТ РАН, 2013. С. 704-706.
- 32. Буйницкая, Ю.Ф. Параметрические модели узлов сочленения элементов стержневых систем / Ю.Ф. Буйницкая // Сборник научных трудов II Всероссийской научнотехнической конференции молодых ученых, аспирантов и студентов с международным участием «Высокие технологии в современной науке и технике». – Томск, 2013. – Т.2 – С. 182-184.
- 33. Буйницкая, Ю.Ф. Требования к прогнозным моделям накопления повреждений стержневых систем / Ю.Ф. Буйницкая // XIV Всероссийская конференция молодых ученых по математическому моделированию и информационным технологиям (15-17 октября 2013г., г. Томск). – Новосибирск: ООО «НПО ДиЛай», 2013. – С. 56.
- 34. Буйницкая, Ю.Ф. Численное моделирование сценариев разрушения телекоммуникационной мачты /Ю.Ф. Буйницкая // Институт машиноведения РАН им. А.А. Благонравова. XXIII Международная Инновационно-ориентированная конференция молодых ученых и студентов (МИКМУС-2011). – М: Изд-во ИМАШ РАН, 2011. – С. 18.
- 35. Бухтиярова, А.С. Живучесть железобетонных пространственных рамно-стержневых конструкций с выключающимися линейными связями : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.23.01 / Бухтиярова Анастасия Сергеевна. – Орел: ФГБОУ ВПО «Госуниверситет – УНПК», 2011. – 21 с.
- 36. Ванин, Г.А. Механика композиционных материалов / Г.А. Ванин. Киев: Наукова думка, 1985. – 302 с.
- Васильев, В.В. Механика конструкций из композитных материалов / В.В. Васильев. М.: Машиностроение, 1988. – 288 с.
- 38. Вильнав, Ж.Ж. Клеевые соединения / Ж.Ж. Вильнав. М.: Техносфера, 2007. 384 с.

- 39. Волков, В.М. Живучесть тонкостенных конструкций в эксплуатационных условиях / В.М. Волков // Механика разрушения и надежность судовых конструкций: Межвуз. сб. – Горький: Горьк. политехн. ин-т., 1987. – С. 17-23.
- 40. Волков, Д.П. Динамика и прочность одноковшовых экскаваторов. Монография / Д.П. Волков. М.: Машиностроение, 1965. 464 с.
- 41. Воробей, В.В. Соединения конструкций из композиционных материалов / В.В. Воробей, О.С. Сироткин. Л.: Машиностроение, 1985. 168 с.
- 42. Гайджуров, П.П. Методы, алгоритмы и программы расчета стержневых систем на устойчивость и колебания / П.П. Гайджуров. – Новочеркасск: ЮРГТУ, 2010. – 230 с.
- 43. Геллер, Б.Э. Практическое руководство по физико-химии волокнообразующих полимеров / Б.Э. Геллер. – М.: Химия, 1996. – 432 с.
- 44. Гениев, Г.А. Прочность и деформативность железобетонных конструкций при запроектных воздействиях / Г.А. Гениев, В.И. Колчунов, Н.В. Клюева. – М.: Изд-во АСВ, 2004. – 216 с.
- 45. Голямин, И.П. Ультразвук. Маленькая энциклопедия / глав. ред. И.П. Голямина. М.: Советская энциклопедия, 1979. 400 с.
- 46. Горев, В.В. Металлические конструкции. В 3 т. Т.1. Элементы конструкций: учеб. для строит. вузов / В.В. Горев, Б.Ю. Уваров, В.В. Филиппов, и др.; под ред. В.В. Горева. 3-е изд., стер. М.: Высш. шк., 2004. 551 с.
- 47. Горев, В.В. Металлические конструкции. В 3 т. Т.2. Концепция зданий: учеб. для строит. вузов / В.В. Горев, Б.Ю. Уваров, В.В. Филиппов, Б.И. Белый и др.; под ред. В.В. Горева. 3-е изд., стер. М.: Высш. шк., 2004. 528 с.
- 48. Горев, В.В. Металлические конструкции. В 3 т. Т.3. Специальные конструкции и сооружения: учеб. для строит. вузов; под ред. В.В. Горева. 2-е изд., стер. М.: Высш. шк., 2002. 544 с.
- 49. ГОСТ 15.016-2016. Система разработки и постановки продукции на производство. Техническое задание. Требования к содержанию и оформлению. – Введ. 2017-09-01 – М.: Стандартинформ, 2017. – 27 с.
- 50. ГОСТ 27.002-2015. Надежность в технике. Термины и определения. Вед. 2017-03-01. –
  М.: Стандартинформ, 2016. 24 с.
- 51. ГОСТ 27.002-89. Надежность в технике. Основные понятия. Термины и определения. Введен. 1990-07-01. М.: Стандартинформ, 2016. 24 с.
- 52. ГОСТ 27772-2015. Прокат для строительных стальных конструкций. Общие технические условия. Минск.: Евразийский совет по стандартизации, метрологии и сертификации, 2015. 33 с.
- 53. ГОСТ 32656-2014. Композиты полимерные. Методы испытаний. Испытания на растяжение. М.: Стандартинформ, 2014. 35 с.
- 54. ГОСТ Р 53387-2009. Лифты, эскалаторы и пассажирские конвейеры. Методология анализа и снижения риска.
- 55. Гришкевич, А.И. Автомобили: Конструкция, конструирование и расчет. Системы управления и ходовая часть [Текст]: учеб. пособие для вузов / А.И. Гришкевич, Д.М. Ломако, В.П. Автушко и др.; под. ред. А.И. Гришкевича; Мн.: Высш. шк., 1987. 200 с.
- 56. Грызунов, В.В. Оценивание живучести неоднородных структур / В.В. Грызунов // Вестник СибГУТИ. – 2011. – № 1. – С. 28-36.hbce
- 57. Дарков, А.В. Строительная механика / А.В. Дарков, Н.Н. Шапошников. СПб.: Лань, 2010. 656 с.
- 58. Двейрин, А.З. Испытание на смятие слоистых пластиков / А.З. Двейрин, С.П. Кривенда // Вопросы проектирования и производства конструкций летательных аппаратов: сб. науч. трудов. Нац. аэрокосм. ун-та им. Н.Е. Жуковского «ХАИ». – 2011. – Выпуск 1 (65). – С. 20-28.
- 59. Дедков, В.К. Живучесть и безопасность сложных технических систем / В.К. Дедков, В.И. Водолазский, А.В. Мухин, А.И. Фесечко // Вопросы теории безопасности и устойчивости систем. – 2002. – № 4. – С. 63-79.
- 60. Дмитриев, Ф.Д. Крушения инженерных сооружений: историко-технические очерки / Ф.Д. Дмитриев. М.: Госстройиздат, 1953. 188 с.
- 61. Долгов, В.В. Моделирование теплового разрушения корпуса реактора при тяжелой аварии на АЭС с реакторами типа водоводяных энергетических реакторов (ВВЭР) / В.В. Долгов, М.В. Кащеев, Ю.В. Муранов // Теплофизика высоких температур. 1996. Вып. 34. № 5. С. 770-779.
- Домбровский, Н.Г. Экскаваторы. Общие вопросы теории, проектирования и применения / Н.Г. Домбровский. – М.: Машиностроение, 1962. – 318 с.
- 63. Доронин, С.В. Методическое и численное обеспечение верификации прочности рефлектора зеркальной антенны / С.В. Доронин, Е.М. Рейзмунт, Ю.Ф. Филиппова // Безопасность и мониторинг техногенных и природных систем: материалы и доклады. VI Всероссийская конференция (Красноярск, 18-21 сентября 2018 года; науч. ред. В.В. Москвичев. Красноярск: Сиб. фед. ун-т, 2018. С. 174-177.
- 64. Доронин, С.В. Оценка живучести повреждаемых колебательных систем стержневого типа / С.В. Доронин, Ю.Ф. Филиппова // Динамика систем, механизмов и машин. 2019. Том 7. №1. С. 48-54.

- 65. Доронин, С.В. Логико-вероятностное моделирование аварийных ситуаций технических систем / С.В. Доронин, Т.А. Чурсина // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2003. – № 1. – С. 55-64.
- 66. Доронин, С.В. Модальный анализ и динамические характеристики мачтовых конструкций с дефектами и повреждениями / С.В. Доронин, Д.В. Косолапов // Вестник СибГАУ. 2011. № 7(10). С. 25-28.
- 67. Доронин, С.В. Оценка нагруженности и обоснование снижения металлоемкости каркаса телекоммуникационного контейнера в экстремальных условиях эксплуатации / С.В. Доронин, Е.М. Сигова, Ю.Ф. Буйницкая // Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета имени академика М.Ф. Решетнева. – 2011. – № 7. – С. 94-98.
- 68. Доронин, С.В. Требования к информационным моделям структур стержневых конструкций / С.В. Доронин, Ю.Ф. Буйницкая // V Международная конференция «Системный анализ и информационные технологии» САИТ 2013 (19-25 сентября 2013 г., г. Красноярск, Россия): Труды конференции. В 2-х т. Т. 1. Красноярск: ИВМ СО РАН, 2013. С. 66-70.
- 69. Дроздова, Л.Г. Одноковшовые экскаваторы: конструкция, монтаж и ремонт: учеб. пособие / Л.Г. Дроздова, О.А. Курбатова. – Владивосток: Изд-во ДВГТУ, 2007. – 235 с.
- Дыховичный, Ю.А. Пространственные составные конструкции: Учеб. пос. для студ. по спец. «Пром. и гражд. строит.» / Ю.А. Дыховичный, Э.З. Жуковский. – М.: Высш. шк., 1989 – 288 с.
- 71. Егорочкина, И.О. Анализ влияния дефектов в основании опоры ЛЭП на параметры собственных поперечных колебаний на основе аналитической модели / И.О. Егорочкина, Е.А. Шляхова, А.В. Черпаков, А.Н. Соловьев // Инженерный вестник Дона. – 2015. – № 4. – С. 94.
- 72. Еремин, К.И. Моделирование развития усталостных повреждений в подкрановоподстропильных фермах/ К.И. Еремин, С.Н. Шульга // Вестник МГСУ. – 2014. – № 2. – С. 30-38.
- 73. Железняков, А.Б. Тайны ракетных катастроф. Плата за прорыв в космос / А.Б. Железняков. – М.: Эксмо, 2011. – 544 с.
- 74. Живейнов, Н.Н. Строительная механика и металлоконструкции строительных и дорожных машин: учебник для вузов по специальности «Строительные и дорожные машины и оборудование» / Н.Н. Живейнов, Г.Н. Карасев, И.Ю. Цвей. М.: Машиностроение, 1988. 280 с.
- 75. Израилев, Ю.Л. Живучесть паропроводов стареющих тепловых электростанций / Под ред. Ю.Л. Израилева, Ф.А. Хромченко. М.: ТОРУС ПРЕСС, 2002. 616 с.

- 76. Ишков, А.М. Характерные разрушения деталей машин и металлоконструкций / Отв. ред. А.М. Ишков. – Якутск: ЯФ СО АН СССР, 1988. – 40 с.
- 77. Ишлинский, А.Ю. Новый политехнический словарь / под ред. А.Ю. Ишлинского. М.: Научное издательство «Большая российская энциклопедия», 2000. 671 с.
- 78. Кан, С.Н. Расчет самолетов на прочность / С.Н. Кан, И.А. Свердлов. М.: Машиностроение, 1966. – 520 с.
- 79. Капелюшник, И.И. Технология склеивания деталей в самолетостроении / И.И. Капелюшник, И.И. Михалев, Б.Д. Эйдельман. М.: Машиностроение, 1972. 224 с.
- Кейгл, Ч. Клеевые соединения / пер. с анг. В.П. Батизата, И.М. Заманского, А.П. Петровой. М.: Мир, 1979. 159 с.
- 81. Клюева, Н.В. Основы теории живучести железобетонных конструктивных систем при запроектных воздействиях : автореф. дис. ... докт. техн. наук : 05.23.01 / Клюева Наталия Витальевна. – М.: МГАКХиС, 2009. – 42 с.
- Кобзев, А.П. Козловые краны и мостовые перегружатели. Краны кабельного типа / А.П.
   Кобзев, В.П. Пономарев. Красноярск: ИПЦ КГТУ, 2005. 140 с.
- 83. Ковалев, А.П. О живучести объектов энергетики / А.П. Ковалев, В.В. Якимишина // Промышленная энергетика. – 2006. – № 1. – С. 20-26.
- 84. Козлов, М.В. Моделирование живучести систем энергетики: методология, модель, реализация / М.В. Козлов, Ю.Е. Малашенко, В.С. Рогожин, И.А. Ушаков, Т.В. Ушакова М.: ВЦ АН СССР, 1986. 59 с.
- 85. Коковин, В.А. Живучесть корабля / Под ред. В.А. Коковина. СПб.: Левша, 2009. 376 с.
- 86. Комаров, Г.В. Свойства ПКМ, влияющие на их способность соединяться / Г.В. Комаров // Полимерные материалы. 2010. №2-3. С.18-27.
- 87. Конкевич Л. Летопись крушений и других бедственных случаев военных судов русского флота / Л. Конкевич. – СПб., 1974. – 68 с.
- 88. Коношенков, А.А. Разработка расчетной модели разрушения грунтовой перемычки в аварийном водосбросе/ А.А. Коношенков // Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С.О. Макарова. – 2016. – № 4. – С. 94-104.
- 89. Корн, Г. Справочник по математике для научных работников и инженеров / Г. Корн, Т. Корн. М.: Наука, 1977. 830 с.
- 90. Корнева, Е.А. Расчет сооружений на прогрессирующее обрушение / Е.А. Корнева, Зуй Бакч Као, Б.С. Расторгуев, А.И. Плотников // Вестник МГСУ. 2008. № 1. С. 102-107.

- 91. Коробейников, С.Н. Нелинейное деформирование твердых тел / С.Н. Коробейников. Новосибирск: Издательство СО РАН, 2000. 262 с.
- 92. Короткин, И.М. Аварии и катастрофы кораблей / И.М. Короткин. Л.: Судостроение, 1977. 296 с.
- 93. Кочкаров, А.А. Распространение внешних воздействий по структуре сложной системы / А.А. Кочкаров, Г.Г. Малинецкий // Математическое моделированиею. – 2006. – № 2. – С. 51-60.
- 94. Кочкаров, А.А. Стойкость технических систем: моделирование распространения внешних воздействий по структуре сложной системы / А.А. Кочкаров, А.Р. Салпагарова, Л.Х. Хапаева // Известия ЮФУ. Технические науки. 2009. № 5. С. 228-234.
- 95. Крапивин, В.Ф. О теории живучести сложных систем / В.Ф. Крапивин. М.: Наука, 1978. – 248 с.
- 96. Кудишин, Ю.И. Концептуальные проблемы живучести строительных конструкций / Ю.И. Кудишин // Вестник МГСУ. 2009. № 2. С. 28-36.
- 97. Кудишин, Ю.И. Металлические конструкции / Ю.И. Кудишин, Е.И. Беленя. М.: Издательский центр «Академия», 2007 – 688 с.
- 98. Кудишин, Ю.И. Методика расчета строительных конструкций на единичную живучесть / Ю.И. Кудишин, Д.Ю. Дробот // Сб. науч. тр. междунар. симпозиума «Современные металлические и деревянные конструкции (нормирование, проектирование и строительство)». – Брест: БрГТУ, 2009. – С. 132-141.
- 99. Кузнецов, В.В. Металлические конструкции. В 3 т. Т.З. Стальные сооружения, конструкции из алюминиевых сплавов. Реконструкция, обследование, усиление и испытание конструкций зданий и сооружений. (Справочник проектировщика) / Под общ. ред. заслуж. строителя РФ, лауреата госуд. премии СССР В.В. Кузнецова (ЦНИИпроектстальконструкция им. П.П. Мельникова) – М.: изд-во АСВ, 1999. – 528 с.
- 100. Кулешов, А.А. Мощные экскаваторно-автомобильные комплексы карьеров / А.А. Кулешов. М.: Недра, 1980. 317 с.
- 101. Куракин, А.Л. Теоретическое выражение живучести сложных систем / А.Л. Куракин // Математическое моделирование. 1996. № 10. С. 15-24.
- 102. Кучерявый, В.И. Статистическое моделирование характеристик живучести элементов машин при циклическом воздействии / В.И. Кучерявый, В.Д. Чарков. // Проблемы машиностроения и надежности машин. – 1997. – № 6. – С. 59-63.
- 103. Лагерев, И.А. Повышение трещиностойкости и живучести элементов узлов соединений секций грузоподъемных стрел крано-манипуляторных установок мобильных машин /

И.А. Лагерев // Научно-технический вестник Брянского государственного университета. – 2015. – № 2. – С. 16-22.

- 104. Лепихин, А.М. Надежность, живучесть и безопасность сложных технических систем / А.М. Лепихин, В.В. Москвичев, С.В. Доронин // Вычислительные технологии. 2009. № 6. С. 58-70.
- 105. Лесецкий, В.А. Буровые машины и механизмы. Учебник для техникумов / В.А. Лесецкий, А.Л. Ильский. – М.: Недра, 1980. –391 с.
- 106. Макаров, С.О. Разбор элементов, составляющих боевую силу судов / С.О. Макаров // Морской сборник. – 1894. – № 2. – С. 10-18.
- 107. Мандриков, А.П. Примеры расчета металлических конструкций: учеб. пособие для техникумов. – 2-е изд., перераб. и доп. / А.П. Мандриков. – М.: Стройиздат, 1991. – 431 с.
- 108. Махутов, Н.А. Особенности обеспечения безопасности критических инфраструктур / Н.А. Махутов, Д.О. Резников, В.П. Петров // Безопасность в техносфере. – 2014. – №1. – С. 3-14.
- 109. Махутов, Н.А. Оценка живучести сложных технических систем / Н.А. Махутов, В.П. Петров, Д.О. Резников // Проблемы безопасности и чрезвычайных ситуаций. 2009. № 3. С. 47-66.
- 110. Мельников, Н.П. Металлические конструкции. 2-е изд., перераб. и доп. / Н.П. Мельников. – М.: Стройиздат, 1980 – 776 с.
- 111. Мельников, Н.П. Стальные конструкции. Справочник проектировщика. Изд. 3-е., перераб. и доп. / Н.П. Мельников. М.: Стройиздат, 1976. 328 с.
- 112. Михеев, Н.Н. Живучесть элементов тонкостенных судовых конструкций при двухчастотном нагружении / Н.Н. Михеев // Механика разрушения и надежность судовых конструкций: Межвуз. сб. – Горький: Горьк. политехн. ин-т., 1987. – С. 60-67.
- 113. Муравенко, В.А. Буровые машины и механизмы. Том 1 / В.А. Муравенко, А.Д. Муравенко, В.А. Муравенко. Москва-Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2002. 520 с.
- 114. Муханов, К.К. Металлические конструкции. Учебник для вузов. Изд. 3-е испр. и доп. / К.К. Муханов. – М.: Стройиздат, 1978 – 572 с.
- 115. Нашиф, А. Демпфирование колебаний / А. Нашиф, Д. Джоунс, Дж. Хендерсон. М.: Мир, 1988. – 448 с.
- 116. Никонов, В.В. Об условиях применения моделей типа Пэриса-Эрдогана к расчетам живучести элементов авиаконструкций при случайных нагрузках / В.В. Никонов, В.С. Шапкин // Научный вестник МГТУ ГА. – 2010. – № 161. – С. 15-23.

- 117. ОДМ 218.3.008.-2011. Рекомендации по мониторингу и обследованию подпорных стен и удерживающих сооружений на оползневых участках автомобильных дорог. – Вед. 2011-03-30. – М.: Росавтодор, 2011. – 42 с.
- 118. Ожегов, С.И. Толковый словарь русского языка: Ок. 100 000 слов, терминов и фразеологических выражений / С. И. Ожегов; под ред. проф. Л. И. Скворцова. – 28 е изд., перераб. – М.: ООО «Издательство «Мир и Образование»: ООО «Издательство Оникс», 2012. – 1376 с.
- 119. ОРД Техническая эксплуатация железобетонных конструкций производственных зданий. Часть 1. Москва, 1993. – 140 с.
- 120. Панасенко Н.Н. Конечно-элементная модель демпфирования колебаний несущих металлоконструкций грузоподъемных кранов / Н.Н. Панасенко, В.В. Рабей, Л.С. Синельщикова // Вестник АГТУ. – 2013. – №2 (56). – С. 41-49.
- 121. Панасюк, В.В. Механика разрушения и прочность материалов: справ. пособие. в 4 т. Т. 1. Основы механики разрушения / В.В. Панасюк, А.Е. Андрейкив, В.З. Партон. – Киев: Наукова думка, 1988. – 488с.
- 122. Пат. №2477350 Российская Федерация, МПК Е02В 17/02 (2006.01). Ледостойкий буровой комплекс для освоения мелководного континентального шельфа и способ формирования ледостойкого бурового комплекса для освоения мелководного континентального шельфа / Б.Р. Лившиц, А.А. Алисейчик, В.Ф. Ленский, Д.Ф. Халикова; заявитель и патентообладатель ПАО «Центральное конструкторское бюро «Коралл». № 2011130362/03; заявл. 20.07.2011; опубл. 10.03.2013, Бюл. №7.
- 123. Перельмутер, А.В. О расчетах сооружений на прогрессирующее обрушение / А.В. Перельмутер // Вестник МГСУ. 2008. № 1. С. 119-128.
- 124. Перельмутер, А.В. Об оценке живучести несущих конструкций / А.В. Перельмутер // Металлические конструкции. Работы школы профессора Н.С. Стрелецкого. – М.: МГСУ. – 1995. – С. 62-68.
- 125. Петропавловский, А.А. Вантовые мосты / А.А. Петропавловский, Е.И. Крыльцов. М.: Транспорт, 1985. – 224 с.
- 126. Петропавловский, А.А. Проектирование металлических мостов / А.А. Петропавловский, Н.Н. Богданов, Н.Г. Бондарь, и др. – М.: Транспорт, 1982. – 320 с.
- 127. Петухов, П.З. Специальные краны: Учебное пособие для машиностроительных вузов по специальности «Подъёмно-транспортные машины и оборудование» / П.З. Петухов, Г.П. Ксюнин, Л.Г. Серлин. – М.: Машиностроение, 1985. – 246 с.

- 128. Плютов, Ю.А. Расчеты прочности рамных конструкций карьерных автосамосвалов [Текст]: учеб. пособие / Ю.А. Плютов, С.В. Доронин, Т.В. Астахова. – Красноярск, 2005. – 88 с.
- 129. ПНАЭ Г-05-035-94. Учет внешних воздействий природного и техногенного происхождения на ядерно-и радиационно опасные объекты.
- 130. Подэрни, Р.Ю. Горные машины и комплексы для открытых работ / Р.Ю. Подэрни. М.: Недра, 1985. – 544 с.
- 131. Покровский, А.М. Оценка живучести магистральных трубопроводов с учетом остаточных сварочных напряжений / А.М. Покровский, О.А. Волоховская, В.Г. Лешковцев, Г.Я. Пановко // Проблемы машиностроения и надежности машин. – 2007. – № 3. – С. 110-117.
- 132. Полилов, А.Н. Экспериментальная механика композитов: учеб. пособие / А.Н. Полилов. Москва: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2015. 375 с.
- 133. Приказ Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 12 ноября 2013. № 533. Об утверждении Федеральных норм и правил в области промышленной безопасности «Правила безопасности опасных производственных объектов, на которых используются подъемные сооружения».
- 134. Пучков, В.А. Гражданская защита: Энциклопедический словарь / под общ. ред. В.А. Пучкова / МЧС России. М.: ФГБУ ВНИИ ГОЧС (ФЦ), 2015. 664 с.
- 135. Р 50.1.028-2001. Информационные технологии поддержки жизненного цикла продукции. Методология функционального моделирования.
- 136. Рабинович, И.М. Основы строительной механики стержневых систем / И.М. Рабинович.
   М.: Стройиздат, 1960. 516 с.
- 137. Работнов, Ю.Н. Механика армируемого твердого тела / Ю.Н. Работнов. М.: Наука, 1988. – 712 с.
- 138. Райзер, В.Д. К проблеме живучести зданий и сооружений / В.Д. Райзер // Строительная механика и расчет сооружений. 2012. № 5. С. 77-78.
- 139. Райкунов, Г.Г. Фундаментальные космические исследования. В 2 кн. Кн. 1. Астрофизика / под науч. ред. докт. техн. наук, проф. Г.Г. Райкунова. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2014. – 452 с.
- 140. РБ Г-05-039-96. Руководство по анализу опасности аварийных взрывов и определению параметров их механического действия.
- 141. Ржаницын, А.Р. Строительная механика / А.Р. Ржаницын. М.: Высшая школа, 1982. 400 с.

- 142. Родионов, А.А. Численное моделирование разрушения днищевого перекрытия при столкновении судна с подводным камнем / А.А. Родионов, Аунг Куи Мьинт // Тр. ЦНИИ им. акад. А.ЕН. Крылова. – 2014. – № 82. – С.31-36.
- 143. Розенштейн, И.М. Аварии и надежность стальных резервуаров / И.М. Розенштейн. –
   М.: Недра, 1995. 253 с.
- 144. Рудаков, К.Н. Моделирование болтовых соединений из ПКМ в программном комплексе FEMAP/NX NASTRAN / К.Н. Рудаков, С.Н. Шукаев // Вісник Національного технічного університету України Київський політехнічний інститут. Серія: Машинобудування. – 2013. – № 67. – С. 199-206.
- 145. Руденко, Д.В. Защита каркасных зданий от прогрессирующего обрушения / Д.В. Руденко, В.В. Руденко // Инженерно-строительный журнал. 2009. № 3. С. 38-41.
- 146. Рычков, С.П. MSC.VisualNASTRAN для Windows / С.П. Рычков. М.: НТ Пресс, 2004. 552 с.
- 147. Савицкий, Г.А. Антенно-мачтовые сооружения: учеб. пособие для техникумов связи / Г.А. Савицкий. – М.: Связьиздат, 1962. – 230 с.
- 148. Савицкий, Г.А. Основы расчета радиомачт: статика и динамика / Г.А. Савицкий. М.: Связьиздат, 1953. – 278 с.
- 149. Светлицкий, В.А. Механика стержней / В.А. Светлицкий. М.: Высшая школа, 1987. 320 с.
- 150. Свищев, Г.П. Авиация: Энциклопедия / гл. ред. Г.П. Свищев. М.: Научное издательство «Большая российская энциклопедия», 1994. – 736 с.
- 151. Семин, М.И. Расчеты соединений элементов конструкций из полимерных материалов на прочность и долговечность / М.И. Семин. М.: МАДИ, 2016. 92 с.
- 152. Сендеров, Б.В. Аварии жилых зданий / Б.В. Сендеров. М.: Стройиздат, 1991. 216 с.
- 153. Сироткин, О.С. Проектирование, расчет и технология соединений авиационной техники / О.С. Сироткин, В.И. Гришин, В.Б. Литвинов. – М.: Машиностроение, 2006. – 324 с.
- 154. Смирнов, А.Ф. Строительная механика. Стержневые системы / под ред. А.Ф. Смирнова.
   М.: Стройиздат, 1981. 512 с.
- 155. Соколов С.А. Строительная механика и металлические конструкции машин: учебник / С.А. Соколов. – СПб.: Политехника, 2011. – 425 с.
- 156. Соколов, А.Г. Опоры линий передач (расчет и конструирование) / А.Г. Соколов. М.: Стройиздат, 1961. – 171 с.
- 157. СП 13-102-2003. Правила обследования несущих строительных конструкций зданий и сооружений. Вед. 2003-08-21. М.: ГОССТРОЙ РОССИИ, 2003 26 с.
- 158. СП 14.13330.2014. Строительство в сейсмических районах. Актуализированная редак-

ция СНиП II-7-81\*. – Введ. 2014-06-01. – М.: Стандартинформ, 2014. – 125 с.

- 159. СП 16.13330.2017. Стальные конструкции. Актуализированная редакция СНиП II-23-81\*. – Введ. 2017-08-28. – М.: Стандартинформ, 2017 – 145 с.
- 160. СП 20.13330.2016. Нагрузки и воздействия. Актуализированная редакция СНиП
   2.01.07-85\*. Введ. 2017-06-04 М.: Стандартинформ, 2016. 105 с.
- 161. СП 296.1325800.2017. Здания и сооружения. Особые воздействия. Введ. 2018-02-04.
   М.: Стандартинформ, 2017 23 с.
- 162. СП 385.1325800.2018. Защита зданий и сооружений от прогрессирующего обрушения. Правила проектирования. Основные положения. – М.: Стандартинформ, 2018.
- 163. СТ МЭК 50(151)-78. Электрические и магнитные устройства.
- 164. Стекольников, Ю.И. Живучесть систем / Ю.И. Стекольников. СПб.: Политехника, 2002. – 155 с.
- 165. Стрелецкий, Н.С. Металлические конструкции / Н.С. Стрелецкий. М.: Стройиздат, 1961. – 776 с.
- 166. Стружанов, В.В. Об одном подходе к определению живучести технических систем / В.В. Стружанов // Проблемы безопасности и чрезвычайных ситуаций. 2009. № 1. С. 3-11.
- 167. Талантов, И.С. Спектрально-численный метод динамического расчета физически нелинейных стержневых систем с выключающимися элементами : дис. ... канд. техн. наук : 05.23.17 / Талантов Иван Сергеевич. – СПб.: СПбГАСУ, 2016 – 162 с.
- 168. Тамразян, А.Г. Рекомендации к разработке требований к живучести зданий и сооружений / А.Г. Тамразян // Вестник МГСУ. 2011. № 2. С. 77-83.
- 169. Травиничев, А. Живучесть корабля / А. Травиничев. М.: Госиздат, 1930. 48 с.
- 170. Травуш, В.И. Живучесть конструктивных систем сооружений при особых воздействиях
  / В.И. Травуш, Н.В. Федорова // Инженерно-строительный журнал. 2018. № 5 (81). С. 73-80.
- 171. Уманский, А.А. Справочник проектировщика промышленных жилых и общественных зданий и сооружений. Расчетно-теоретический. В двух книгах. Кн. 2. Под ред. А.А. Уманского. – Изд. 2-е, перераб. и доп. – М.: Стройиздат, 1973 – 416 с.
- 172. Уманский, А.А. Справочник проектировщика промышленных, жилых и общественных зданий и сооружений. В 2-х кн. Кн. 1. Под ред. А.А. Уманского. – Изд. 2-е, перераб. и доп. – М.: Стройиздат, 1972. – 600 с.
- 173. Ушаков, Д.Н. Толковый словарь современного русского языка / Д.Н. Ушаков М.: Аделант, 2013. – 800 с.

- 174. Файбишенко, В.К. Металлические конструкции: учеб. пособие для вузов / В.К. Файбишенко. – М.: Стройиздат, 1984. – 336 с.
- 175. Федеральный закон № 116-ФЗ от 29.07.2018 «О промышленной безопасности опасных производственных объектов».
- 176. Федеральный закон № 190-ФЗ от 27.07.2010 «О теплоснабжении».
- 177. Филиппова, Ю.Ф. Анализ узла соединения трубы и фитинга силового каркаса рефлектора [Электронный ресурс]: материалы XXI Междунар. науч.-практ. конф., посвящ. памяти генерального конструктора ракетно-космических систем академика М.Ф. Решетнева (08-11 нояб. 2017, г. Красноярск) : в 2 ч. / под общ. ред. Ю.Ю. Логинова / Ю.Ф. Филиппова. Электрон. текстовые дан. (1 файл: 24,75 МБ). Систем. требования: Internet Explorer; Acrobat Reader 7.0 (или аналогичный продукт для чтения файлов формата. pdf): СибГУ им. М.Ф. Решетнева. Красноярск, 2017. Ч.1. Режим доступа: https://reshetnev.sibsau.ru/page/materialykonferensii.– Загл. с экрана.
- 178. *Филиппова, Ю.Ф.* Многовариантное моделирование при практической оптимизации стержневого каркаса крупногабаритного рефлектора / Ю.Ф. Филиппова // Информационные и математические технологии в науке и управлении. 2017. № 3. С. 66-74.
- 179. Филиппова, Ю.Ф. Построение информационно-вычислительной метамодели деформирования и разрушения структурно-сложных конструкций / С.В. Доронин, Е.М. Рейзмунт, Ю.Ф. Филиппова // Информационные и математические технологии в науке и управлении. 2019. № 2 (14). С. 16-25. DOI: 10.25729/2413-0133-2019-2-02.
- 180. Филиппова, Ю.Ф. Функциональная модель конструкционной живучести пространственных стержневых систем / Ю.Ф. Филиппова // Безопасность и мониторинг техногенных и природных систем: материалы и доклады / VI Всероссийская конференция (Красноярск, 18-21 сентября 2018 года; науч. ред. В.В. Москвичев. – Красноярск: Сиб. фед. ун-т, 2018. – С. 259-263.
- 181. Форум «копилка катастроф, отказов, поломок ... и выводы из них». // [Электронный pecypc]. URL: <u>http://www.cqham.ru/forum/showthread.php?t=4962</u> (дата обращения 16.06.2011).
- 182. Фрейдин, А.С. Прочность и долговечность клеевых соединений / А.С. Фрейдин. М.: Химия, 1971. – 255 с.
- 183. Фролов, К.В. Вибрации в технике: справочник. в 6-ти т. Т.6. Защита от вибрации и ударов / под ред. К.В. Фролова. – М.: Машиностроение, 1981. – 456 с.
- 184. Хэммонд, Р. Аварии зданий и сооружений / Р. Хэммонд. М.: Госстройиздат, 1960. 186 с.

- 185. Черкесов, Г.Н. Методы и модели оценки живучести / Г.Н. Черкесов. М.: МДНТП, 1987. – 32 с.
- 186. Чирас, А.А. Строительная механика. Теория и алгоритмы / А.А. Чирас. М.: Стройиздат, 1989. – 255 с.
- 187. Шевченко, Д.В. Конечно-элементное моделирование и исследование проблем механики радиотелескопа РТ-70 : дис. ... канд. техн. наук : 01.02.06 / Шевченко Денис Владимирович. – СПб., 2005. – 171 с.
- 188. Шишкин, А.А. Анализ причин аварий и повреждений строительных конструкций.
   / под ред. А.А. Шишкина. Выпуск 2. М.: Стройиздат, 1964. 291 с.
- 189. Шкинев, А.Н. Аварии в строительстве / А.Н. Шкинев. М.: Стройиздат, 1984. 320 с.
- 190. Шухов, В.Г. Строительная механика. Избранные труды / В.Г. Шухов. М.: Наука, 1977. 193 с.
- 191. Adams, R.D. A vibration technique for non-destructively assessing the integrity of structures / R.D. Adams, P. Cawley, C.J. Pye, B.J. Stone // Journal of Mechanical Engineering Science. – 1978. – Vol. 20. – No. 2. – P. 93-100.
- 192. Agarwal, J. Vulnerability of 3-dimensional trusses / J. Agarwal, D. Blockley, N. Woodman // Structural Safety 23 (2001). – P. 203-220.
- 193. ANSYS Theory Reference. Release 16.2
- 194. Askegaard, V. Correlation between changes in dynamic properties and remaining carrying capacity / V. Askegaard, H.E. Langsoe // Materials and Structures. – 1986. – No. 19(109). – P. 11-20.
- 195. Biondini, F. On structural robustness, redundancy and static indeterminacy / F. Biondini, D.M. Frangopol, S. Restelli // Proceedings of the ASCE SEI 2008 Structural Congress – Crossing Borders, Vancouver, Canada, April 24-26. – 2008.
- 196. Blandford, G.E. Progressive failure analysis of inelastic space truss structures / G.E. Blandford // Computers and Structures, 58. – 1996. – No. 5. – P. 981-990.
- 197. Brandon, J.A. Some insights into the dynamics of defective structures / J.A. Brandon // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. Part C: Journal of Mechanical Engineering Science. – 1998. – Vol. 212. – Iss. 6. – P. 441-454.
- 198. Brett, C. Assessment of robustness of structures: current state of research / C. Brett, Y. Lu // Frontiers of Structural and Civil Engineering. 2013, No 7(4). P. 356-368.
- 199. Brunesi, E. Progressive collapse fragility of reinforced concrete framed structures through incremental dynamic analysis / E. Brunesi, R. Nascimbene, F. Parisi, N. Augenti // Engineering Structures. - 2015. - No.104. - P. 65-79.

- 200. Cao, M.S. Structural damage identification using damping: a compendium of uses and features / M.S. Cao, G.G. Sha, Y.F. Gao, W. Ostachowicz // Smart Materials and structures. 2017. No. 26. 043001 (14 pp).
- 201. Cawley, P. The location of defects in structures from measurement of natural frequencies / P. Cawley, R.D. Adams // Journal of Strain Analysis. 1979. Vol. 14. No. 2. P. 49-57.
- 202. Dimarogonas, A.D. Vibration of cracked shafts in bending / A.D. Dimarogonas, C.A. Papadopoulos // Journal of Sound and Vibration. – 1983. – No. 91(4). – P. 583-593.
- 203. Dinu, F. Experimental testing and numerical modeling of steel moment-frame connections under column loss / F. Dinu, I. Marginean, D. Dubina // Engineering Structures. – 2017. – No.151. – P. 861-878.
- 204. Doebling, S.W. A summary review of vibration-based damage identification methods / S.W. Doebling, C.R. Farrar, M.B. Prime // The Shock and Vibration Digest. 1998. No. 30(2). P. 91-105.
- 205. Doronin, S.V. Design evaluation of safety factors for reflector skeleton made of polymer composites / S.V. Doronin, E.M. Reizmunt, Yu.F. Filippova // AIP Conference Proceedings. 2017. №1915. PP. 040009-1 040009-4. https://doi.org/10.1063/1.5017357.
- 206. Doronin, S.V. Information model of damage accumulation and survivability for a joint assembly of a beam skeleton / S.V. Doronin, *Yu.F. Filippova* // AIP Conference Proceedings. 2018. №2053. PP. 040017-1 040017-4. https://doi.org/10.1063/1.5084455.
- 207. Doronin, S.V. Modeling of the multi-level process of damage accumulation in a reflector skeleton with an inhomogeneous structure [Electronic resource] / S.V. Doronin, Yu.F. Filippova // Diagnostics, Resource and Mechanics of materials and structures. – 2018. – Iss. 6. – P. 191-202. – DOI: 10.17804/2410-9908.2018.6.191-202.
- 208. Filippova, Yu.F. Numerical and experimental analysis of deformation and destruction of structurally heterogeneous joint assembly / S.V. Doronin, Yu.F. Filippova // Journal of Physics: Conference Series. – 2019. – Vol. 1260. – Art. 11209/ doi:10.1088/1742-6596/1260/11/112009.
- 209. Friswell, M.I. Damage identification using inverse methods In: Morassi A., Vestroni F. (eds) Dynamic Methods for Damage Detection in Structures / M.I. Friswell // CISM International Centre for Mechanical Sciences: Springer, Vienna. 2008. vol 499. P. 13-66.
- 210. Ghaffarzadeh, H. Redundancy in steel frames with masonry infill walls / H. Ghaffarzadeh,
  R.N. Ghalghachi // World Academy of Science, Engineering and Technology. 2009. No 34,
   P. 923-929.

- 211. Ghosn, M. Redundancy and robustness of highway bridge superstructures and substructures / M. Ghosn, M. Fred, D.M. Frangopol // Structure and Infrastructure Engineering. 2010. No 6: 1-2. P. 257-278.
- 212. Gudmundson, P. The dynamic behavior of slender structures with cross-sectional cracks
  / P. Gudmundson // Journal of the Mechanics and Physics of Solids. 1983. Vol. 31. Iss. 4.
   P. 329-345.
- 213. Gupta, S. Structural failure analysis of 345 kV transmission line / S. Gupta, T.J. Wipf, F. Fanous, M. Baenziger, Y.H. Hahm // IEEE Transaction on Power Delivery. –1994. Vol. 9. № 2. P. 894-903.
- 214. Hartmann, D. Structural collapse simulation under consideration of uncertainty fundamental concept and result / D. Hartmann, M. Breidt, van V. Nguyen, F. Strangenberg, S. Höhler, K. Schweizerhof, S. Mattern, G. Blaukenhorn, B. Möller, M. Liebscher // Computers and Structures, 86. 2008. P. 2064-2078.
- 215. ISO 13822:2010. Основания для расчета конструкций. Оценка.
- 216. ISO/IEC/IEEE 31320-1:2012. (Adoption of IEEE Std 1320.1-1998) ISO/IEC/IEEE International Standard - Information technology – Modeling Languages – Part 1: Syntax and Semantics for IDEF0
- 217. Kam, T.Y. Detection of cracks in structures using modal test data / T.Y. Kam, T.Y. Lee // Engineering Fracture Mechanics. 1992. Vol. 42, No. 2. P. 381-387.
- 218. Kisa, M. The effects of closure of cracks on the dynamics of cracked cantilever beam/ M. Kisa, J. Brandon // Journal of Sound and Vibration. 2000. No. 238(1). P. 1-18.
- 219. Kong, Xuan. The state-of-the-art on framework of vibration-based structural damage identification for decision making / Xuan Kong, C.-S. Cai, J. Hu // Applied Sciences. – 2017. – No. 7(5). – P. 31.
- 220. Landucci, G. The assessment of the damage probability of storage tanks in domino events triggered by fire / G. Landucci, G. Gubinelli, G. Antonioni, V. Cozzani // Accident analysis and prevention. 2009. Vol. 41. P. 1206-1215.
- 221. Lee, Y.-S. A study on crack detection using eigenfrequency test data / Y.-S. Lee, M.-J. Chung // Computers and Structures. 2000. No. 77. P. 327-342.
- 222. Li, L.-L. Analysis of robustness of steel frames against progressive collapse / L.-L. Li, G.-Q.
  Li, B. Jiang, Y. Lu // Journal of Constructional Steel Research. 2018 No.143. P. 264-278.
- 223. Liew, J.Y.R. Survivability of steel frame structures subject to blast and fire / J.Y.R. Liew // Journal of Constructional Steel Research. 2008. No.64.– P. 854-866.

- 224. List of catastrophic collapses of radio masts and towers. URL: http://en.wikipedia.org/wiki/Radio\_masts\_and\_towers\_-\_catastrophic\_collapses (дата обращения: 18.08.2011).
- 225. Liu, W.Y. A study of caprolactam storage tank accident through root cause analysis with a computational approach / W.Y. Liu, C.H. Chen, W.T. Chen, C.M. Shu // Journal of Loss Prevention in the Process Industries. 2017. Vol. 50. P. 80-90.
- 226. Lu, D.-G. Robustness assessment for progressive collapse of framed structures using pushdown analysis methods / D.-G. Lu, S.-S. Cui, P.-Y. Song, Z.-H. Chen // International Journal of Reliability and Safety. – 2012. – Vol. 6, Nos. 1/2/3. – P. 15-37.
- 227. Montalvão, D. An experimental study on the evolution of modal damping with damage in carbon fiber laminates / D. Montalvão, D. Kareanatsis, A. Ribeiro, J. Arina, R. Baxter // Journal of Composite Materials. 2014. No. 49(10). P. 2403-2413.
- 228. Nelid, S.A. Nonlinear vibration characteristics of damaged concrete beams/ S.A. Nelid, M.S. Williams, P.D. McFadden // Journal of Structural Engineering. 2003. No. 129. P. 260-268.
- 229. Okasha, N.M. Time-variant redundancy of structural systems / N.M. Okasha, D.M. Frangopol
  // Structure and Infrastructure Engineering. 2010. No 6: 1-2. P. 279-301.
- 230. Pandey, A.K. Damage detection from changes in curvature mode shape / A.K. Pandey, M. Biswas, M.M. Samman // Journal of Sound and Vibration. 1991. Vol. 145. Is. 2. P. 321-332.
- 231. Razak, H.A. The effect of corrosion on the natural frequency and modal damping of reinforced concrete beams / H.A. Razak, F. Choi // Engineering Structures. 2001. No. 23(9). P. 1126-1133.
- 232. Rizos, P.F. Identification of crack location and magnitude in a cantilever beam from the vibration modes / P.F. Rizos, N. Aspragathos, A.D. Dimarogonas // Journal of Sound and Vibration. 1990. No. 138(3). P. 381-388.
- 233. Rondon, A. Determination of failure pressure modes of the API specification 12f shop-welded flat-bottom tank / A. Rondon, S. Guzey // Journal of pressure vessel technology. – 2017. – Vol. 139. – Pp. 041409 (14 pages).
- 234. Schafer, B.W. Building structural safety decision-making for severe unforeseen hazards /
   B.W. Schafer, P. Bajpai // Proceedings of 2005 NSF DMII Grantees Conference, Scouttsdole, Arizona.
- 235. Shahzad, S. Detection of corrosion-induced damage in reinforced concrete beams based on structural damping identification / Shahzad, H. Yamaguchi, R. Takanami, S. Asamoto // Pro-

ceedings of the Thirteenth East Asia-Pacific Conference on Structural Engineering and Construction (EASEC-13), September 11-13, 2013, Sapporo, Japan, G-2-4.

- 236. Shen, M.-H.H. Natural modes of Bernoulli-Euler beams with symmetric cracks / M.-H.H. Shen, C. Pierre // Journal of Sound and Vibration. – 1990. – No. 138(1). – Pp.115-134.
- 237. Starossek, U. Evaluating measures of structural robustness / U. Starossek, M. Haberland // Proceedings of Structural Congress. – 2009. – P. 1758-1765.
- 238. Starossek, U. Measures of structural robustness requirements & applications / U. Starossek,
   M. Haberland // Proceedings of the ASCE SEI 2008 Structural Congress Crossing Borders,
   Vancouver, Canada, April 24-26. 2008.
- 239. Tsitos, A. Experimental investigation of progressive collapse of steel frames under multihazard extreme loading / A. Tsitos, G. Mosqueda, A. Filiatrant, A.M. Reinhorn // The 14<sup>th</sup> World Conference on Earthquake Engineering, October 12-17, Beijing, China.
- 240. Vlassis, A.G. Progressive collapse of multi-storey buildings due to failed floor impact / A.G.
  Vlassis, B.A. Izzuddin, A.Y. Elghazouli, D.A.Nethercof // Engineering Structures. 2009. No.31 P. 1522-1534.
- 241. Wriggers, P. Computational contact mechanics (Berlin-Helderberg: Springer, 2006), 521 p.
- 242. Xue, S. Dynamics of real structures in fresh, damaged and reinforced states in comparison with shake table and simulation models / S. Xue, H. Tang, J. Okada, T. Hayashi, S. Arikawa // Journal of Asian Architecture and Building Engineering. – 2008. – Vol. 7. – No. 2. – P. 355-362.

### ПРИЛОЖЕНИЕ А

(Обязательное)

Сценарии аварийных разрушений стержневых конструкций



Рисунок А.1 – Сценарий аварии №1. Обрушение восьми стальных радиомачт высотой 186 м

в декабре 1952 г. [А.2]



Рисунок А.2 – Сценарий аварии №2. Разрушение шагающего экскаватора ЭШ – 40/85 на разрезе «Ерковецкий» ОАО «Дальвостуголь» в августе 1998 г. [А.4]

160



Рисунок А.3 – Сценарий аварии №3. Обрушение опор ЛЭП Куйбышев-Москва

# в 1953 г. [А.2]



Рисунок А.4 – Сценарий аварии №4. Падение опоры ЛЭП при ее монтаже в республике Крым

1 декабря 2015 г. [А.1]



Рисунок А.5 – Сценарий аварии №5. Падение башенного крана в Лесосибирске 2 апреля 2015 г. [А.3]



Рисунок А.6 – Сценарий аварии №6. Падение пяти опор ЛЭП в районе Бирюлево-Западное на юге Москвы 29 декабря 2010 г. [А.5]

#### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- А.1 Авария со смертельным исходом в Ленинском районе произошла из-за нарушения техники безопасности служба по технологическому надзору // Интернет газета «Крым 24».
   2016. 1 апр. URL: http://c24news.ru/society/33927-avariya-so-smertelnym-ishodom-v-leninskom-rayone-proizoshla-iz-za-narusheniya-tehniki-bezopasnosti-sluzhba-po-tehnologicheskomu-nadzoru.html (дата обращения 11.04.2016).
- А.2 Беляев, Б.И. Причины аварий стальных конструкций и способы их устранения / Б.И. Беляев, В.С. Корниенко. М.: Стройиздат, 1968. 208 с.
- А.3 В Лесосибирске при падении крана погиб крановщик // Интернет газета «Наш красноярский край». – 2016. – 02 апр. URL: https://gnkk.ru/news/in-lesosibirsk-in-the-fall-cranecrane-operator-was-killed/?sphrase\_id=79909 (дата обращения 15.02.2016).
- А.4 Доронин, С.В. Логико-вероятностное моделирование аварийных ситуаций технических систем / С.В. Доронин, Т.А. Чурсина // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2003. – № 1. – С. 55-64.
- А.5 На юге Москвы упали пять опор ЛЭП // Интернет газета «ЭлектроАс». 2010. 30 дек. URL: http://elektroas.ru/na-yuge-moskvy-upali-pyat-opor-lep (дата обращения 15.02.2016).

162

## ПРИЛОЖЕНИЕ Б

(Обязательное)

#### Сценарии накопления повреждений в узле сочленения



Рисунок Б.1 – Траектория сценария № 1 накопления повреждений



Рисунок Б.2 – Траектория сценария № 2 накопления повреждений



Рисунок Б.3 – Траектория сценария № 3 накопления повреждений



Рисунок Б.4 – Траектория сценария № 4 накопления повреждений



Рисунок Б.5 – Траектория сценария № 5 накопления повреждений



Рисунок Б.6 – Траектория сценария № 6 накопления повреждений



Рисунок Б.7 – Траектория сценария № 7 накопления повреждений



Рисунок Б.8 – Траектория сценария № 8 накопления повреждений



Рисунок Б.9 – Траектория сценария № 9 накопления повреждений



Рисунок Б.10 – Траектория сценария № 10 накопления повреждений



Рисунок Б.11 – Траектория сценария № 11 накопления повреждений



Рисунок Б.12 – Траектория сценария № 12 накопления повреждений



Рисунок Б.13 – Траектория сценария № 13 накопления повреждений



Рисунок Б.14 – Траектория сценария № 14 накопления повреждений



Рисунок Б.15 – Траектория сценария № 15 накопления повреждений



Рисунок Б.16 – Траектория сценария № 16 накопления повреждений



Рисунок Б.17 – Траектория сценария № 17 накопления повреждений



Рисунок Б.18 – Траектория сценария № 18 накопления повреждений
## ПРИЛОЖЕНИЕ В

(Обязательное)

Акты о внедрении результатов исследования



### АКТ

## о внедрении результатов диссертационной работы Филипповой Юлии Федоровны

Настоящим актом подтверждается, что результаты диссертационной работы Ю.Ф. Филипповой использованы при реализации комплексного проекта при финансовой поддержке Правительства Российской Федерации (Договор № 02.G25.31.0147) по теме: «Организация импортозамещающего производства крупногабаритных трансформируемых рефлекторов наземных и космических антенн из интеллектуальных полимерных композиционных материалов на основе безавтоклавных технологий».

При выполнении многовариантного статического и динамического анализа зеркальной антенны наземных систем спутниковой связи предложен вариант декомпозиции узла сочленения стрежневых элементов каркаса и задач расчетного анализа его живучести. Оригинальные результаты, обладающие научной новизной, включают в себя:

 процедуру построения структурной и информационной моделей конструкции с использованием фрейм-описаний элементов и связей;

 – рассмотрение повреждений как состояний, ассоциированных со структурными неоднородностями конструкции, обусловленных неоднородностями как элементов, так и связей между ними;

 модель живучести в форме семантической сети каузального типа, описывающей многоуровневый процесс накопления повреждений, рассматриваемый в первую очередь как информационный процесс.

Эти результаты создают новые знания в предметной области конструкторскотехнологической информатики, а именно обоснование методического подхода к построению информационной модели живучести – сценария многоуровневого процесса накопления повреждений, позволяющей описать все возможные состояния конструкции в течение жизненного цикла с последующей оценкой соответствующих рисков.

#### Директор

Ресурсного центра коллективного пользования «Космические аппараты и системы», канд. физ.-мат. наук

А.Ю. Власов

#### УТВЕРЖДАЮ

Технический директор Кайчук Л.Н 2012г.

АКТ

# о внедрении результатов диссертационной работы Буйницкой Юлии Федоровны

Результаты диссертационной работы Ю.Ф. Буйницкой использованы в ОАО «Красноярский машиностроительный завод» при проектных расчетах на прочность разрабатываемых конструкций телекоммуникационного контейнера-аппаратной для размещения технологического оборудования цифрового телерадиовещания и спутниковой связи.

В результате анализа напряженно-деформированного состояния каркасов контейнера и приставной мачты высотой 12 м установлены фактические запасы прочности конструкций, позволившие разработать конструктивные решения по снижению металлоемкости и обеспечению прочности в экстремальных условиях эксплуатации.

Реализованная автором методика расчета стержневых металлоконструкций может быть использована и для других типов мачтовых и башенных несущих конструкций.

Главный конструктор по ОГН

Len

П.И.Панов