

ФИЛИППОВА Юлия Федоровна

**ОЦЕНКА ЖИВУЧЕСТИ ПОВРЕЖДАЕМЫХ
СТЕРЖНЕВЫХ КОНСТРУКЦИЙ**

01.02.06 – Динамика, прочность машин, приборов и аппаратуры

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Новосибирск – 2020

Работа выполнена в Красноярском филиале Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института вычислительных технологий Сибирского отделения Российской академии наук – Специальном конструкторско-технологическом бюро «Наука» (СКТБ «Наука» ИВТ СО РАН)

Научный руководитель:

Доронин Сергей Владимирович,
кандидат технических наук, доцент,
ведущий научный сотрудник лаборатории
вычислительной механики и риск-анализа
Красноярского филиала ИВТ СО РАН

Официальные оппоненты:

Чернявский Александр Олегович,
доктор технических наук, профессор кафедры
технической механики ФГАОУ ВО «Южно-
Уральский государственный университет
(национальный исследовательский университет)»
(ЮУрГУ (НИУ))

Красноруцкий Дмитрий Александрович,
кандидат технических наук, доцент кафедры
прочности летательных аппаратов ФГБОУ ВО
«Новосибирский государственный технический
университет» (НГТУ)

Ведущая организация:

ФГБОУ ВО «Иркутский национальный
исследовательский технический университет»
(ИРНТУ)

Защита состоится «___» _____ 2020 г. в ___:___ час. на заседании диссертационного совета Д 003.054.02 при Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН по адресу: 630090, г. Новосибирск, пр. академика Лаврентьева, 15. Тел.: (383)333-21-66, Факс: (383)333-16-12, e-mail: kurguzov@hydro.nsc.ru.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке и на сайте Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН, <http://www.hydro.nsc.ru>.

Автореферат разослан: «___» _____ 2020 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,
доктор физико-математических наук

В.Д. Кургузов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

К конструкциям стержневого типа (стержневым конструкциям) относятся составляющие части машин, оборудования, инженерных сооружений в различных отраслях (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 конструкций в поврежденном состоянии слабо изучены, в результате чего высока опасность непрогнозируемого их поведения, приводящего к нарушению работоспособности, в том числе, 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 системное обоснование и разработка технологий исследования живучести, включающих в себя определение специфических показателей, критериев, методик оценки живучести при возникновении и накоплении повреждений стержневой конструкции вне зависимости от отраслевой принадлежности технических объектов. Эти технологии должны основываться на исследованиях напряженно-деформированного состояния конструкций, давать возможность оценивать живучесть в поврежденных состояниях. При обосновании цели и задач исследования под живучестью стержневой конструкции будем понимать свойство сохранять ограниченную работоспособность в соответствии с функциональным назначением при возникновении и накоплении повреждений структуры и узлов сочленения элементов конструкции.

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, отличающиеся расширенным учетом их функционального назначения (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, отличающиеся тем, что основаны на определении и расчетно-экспериментальном исследовании множества возможных 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 параболической 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 электроактивного 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-технической 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); X 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); III 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 публикации, 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 д.т.н., проф. А.В. Лопатину за консультации по описанию свойств ортотропного материала, к.т.н. Е.В. Москвичеву за помощь в проведении экспериментов по разрушению элементов узла сочленения стержневого каркаса и предоставленные результаты экспериментальных исследований механических свойств композиционных материалов.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность темы диссертационной работы, цель и задачи исследования, сформулированы научная новизна, практическая значимость полученных результатов, основные положения, выносимые на защиту.

В **первом разделе** анализируются особенности технических объектов, относящихся к конструкциям стержневого типа. Рассматриваются случаи отдельных крупных аварий, а также статистика катастрофических разрушений стержневых конструкций за 100 лет (на примере

мачтовых и башенных сооружений). Подчеркивается наблюдающийся во многих случаях каскадный, многоэтапный характер развития повреждений и разрушения, при котором разрушение одних стержневых элементов приводит к перегрузке других и последующему их разрушению.

Выполнен обзор исследований и задач анализа живучести стержневых конструкций, существенный вклад в развитие которых внесли Алмазов В.О., Дедков В.К., Бержинский Ю.А., Гениев Г.А., Ключева Н.В., Кудишин Ю.И., Махутов Н.А., Москвичев В.В., Райзер В.Д., Резников Д.О., Augenti N., Brett C., Frangopol D.M., Ghosn M., Haberland M., Hartmann D., Restelli S., Starossek U. и др. исследователи. Отмечается большое разнообразие подходов к количественному оцениванию живучести, основанных на учете величин риска (ущерба), связности и избыточности поврежденных конструкций, количества поврежденных конструктивных элементов, интенсивности развития повреждений и других характеристик. Показатели живучести определяются в детерминированной и вероятностной постановках, в некоторых случаях основываясь на гипотетических сценариях развития повреждений. Квинтэссенцией понятия живучести является степень чувствительности объекта к локальным повреждениям и неблагоприятным внешним воздействиям при сохранении как минимум частичной работоспособности.

Известные показатели живучести не учитывают системных особенностей конкретных классов технических объектов и, как следствие, не позволяют анализировать все аспекты живучести в связи с конструктивной формой объекта. Отмечается отсутствие регламентов практического применения показателей живучести: нет ясности в выборе принимаемых в учет неблагоприятных факторов и событий, или их последовательности (сценариев), вызываемых ими повреждений и разрушений, алгоритмов получения количественных оценок. Таким образом, 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.

Выполнена системная декомпозиция стержневых конструкций и свойства их живучести. Показано, что свойства стержневых конструкций являются результатом системного взаимодействия стержневых элементов, их соединений и пространственного расположения стержней относительно друг друга (конструктивной схемы – структуры). В соответствии с требованиями ISO/IEC/IEEE 31320-1:2012 и Р 50.1.028-2001 построена функциональная модель анализа живучести, определяющая исчерпывающие требования к содержанию комплекса моделей анализа живучести. С позиций системного подхода живучесть стержневой конструкции определяется живучестью структуры конструкции и живучестью узлов сочленения стержневых элементов. 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.

Второй раздел посвящен анализу напряженно-деформированного состояния (НДС) повреждаемых стержневых конструкций. В связи с этим во втором разделе обоснован состав алгоритмов, включаемых в разрабатываемые вычислительные модели живучести в качестве самостоятельных модулей. К таковым относятся алгоритмы как статического упругого анализа, так и анализа физико-технических эффектов при возникновении и развитии повреждений и/или в запроектных условиях нагружения. Они включают в себя базовую вычислительную модель статического упругого анализа – БВМСУА, вычислительную модель упругопластического деформирования – ВМУПД, вычислительную модель контактного взаимодействия – ВМКВ, вычислительную модель потери устойчивости – ВМПУ. Использование рассматриваемых вычислительных моделей в качестве составных частей разрабатываемых алгоритмов позволяет при кон-

струировании вычислительных моделей анализа живучести основное внимание уделить логике организации учета накопления повреждений и разрушения структурных элементов и связей.

Повреждения стержневых конструкций заключаются в разрушении их структурных элементов – отдельных стержней. В связи с этим исследуются три возможных варианта практической технологии моделирования разрушения стержней путем модификации геометрической или конечно-элементной модели: 1) удаление стержня из расчетной схемы (модели); 2) разрезание стержня в разрушенном сечении; 3) использование вычислительной технологии «рождения и смерти элементов» (РСЭ) – уменьшение жесткости КЭ на несколько порядков (рис. 1). Показано, что применение той или иной технологии моделирования разрушения структурных элементов может быть использовано в зависимости от цели анализа: для оценки НДС в статической постановке – все три варианта технологии равнозначны; для оценки только собственных частот и форм колебаний целесообразно использовать технологию моделирования разрушения путем геометрической модификации модели – разрезанием стержня в месте предполагаемого разрушения; для оценки НДС в динамической постановке – целесообразно использовать технологию РСЭ.



Рис. 1. Взаимосвязь технологий моделирования разрушения стержней и анализа НДС конструкций

Рассматриваются три альтернативных варианта получения оценок НДС при наличии повреждений: 1) статический анализ НДС: рассматриваются последовательные состояния поврежденности конструкции, для каждого из которых выполняется аналитический или численный статический анализ напряжений и деформаций. В этом случае получают оценки НДС в установившемся стационарном состоянии; 2) статический анализ НДС с упрощенным учетом импульсных эффектов при разрушении стержневых элементов (практически мгновенном выключении связей); 3) численное решение уравнений динамики с использованием неявных методов интегрирования с использованием схемы Ньюмарка.

Учет импульсных эффектов при разрушении стержневых элементов осуществляется в предположении, что длительность процесса разрушения измеряется сотыми и десятными долями секунды, и основан на

методике Г.А. Гениева*, рассматривающей условия постоянства полной удельной энергии при переходе n -раз статически неопределимой стержневой конструкции вследствие разрушения структурного элемента в $(n-1)$ -раз статически определимую систему. При этом динамические пиковые значения напряжений σ_{n-1}^d определяются из значений статических напряжений до σ_n^c и после σ_{n-1}^c разрушения: $\sigma_{n-1}^d = 2\sigma_{n-1}^c - \sigma_n^c$. Это выражение позволяет оценить пиковые значения динамических напряжений в момент разрушения стержневого элемента по результатам статического расчета в неповрежденном и поврежденном состояниях (или на последовательных стадиях разрушения конструкции).

Для получения оценок НДС повреждаемых структурно-сложных стержневых конструкций предложена и апробирована инженерная методика, включающая в себя:

* Гениев, Г.А. Прочность и деформативность железобетонных конструкций при запроектных воздействиях / Г.А. Гениев, В.И. Колчунов, Н.В. Ключева. – М.: Изд-во АСВ, 2004. – 216 с.

- 1) обоснование сценариев последовательного разрушения структурных элементов;
- 2) получение численных оценок собственных частот конструкций в поврежденных состояниях;
- 3) определение интервальных оценок характеристик демпфирования конструкций-аналогов;
- 4) разработка вычислительной модели с описанием последовательного разрушения структурных элементов технологией РСЭ;
- 5) численный анализ переходных процессов путем прямого неявного интегрирования полных уравнений динамики.

Таким образом, в зависимости от особенностей постановки задачи анализа живучести могут быть использованы различные сочетания технологий моделирования разрушения структурных элементов и анализа НДС (рис. 1). Решение модельных задач по анализу НДС повреждаемой пространственной стержневой конструкции со сравнительным анализом результатов, полученных с использованием различных вариантов технологий (рис. 1), показал, что для получения оценок живучести целесообразны результаты анализа переходных процессов с моделированием разрушения с применением технологии РСЭ.

В **третьем разделе** предложены и апробированы количественные показатели, критерии, методики оценки структурной живучести стержневых конструкций в связи с их функциональным назначением. Под структурной живучестью понимается свойство сохранять ограниченную работоспособность при наличии повреждений определенного вида (разрушение структурных элементов и/или связей между ними), обеспечиваемое структурой и выражающееся в количественных показателях чувствительности той или иной функциональной характеристики к повреждениям структуры. В качестве функциональных характеристик рассматриваются:

для силовых конструкций – значения максимальных напряжений или минимальных фактических коэффициентов запаса;

для колебательных систем – спектр собственных частот свободных колебаний;

для прецизионных объектов – характеристики точности и формостабильности.

В качестве степени поврежденности рассматривается количество разрушенных элементов (связей).

Предложена *методика оценки структурной живучести*, в общем виде включающая в себя:

- 1) анализ целевого назначения 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 критериев живучести, определяющих условия, при которых живучесть может считаться обеспеченной, и при которых необеспеченной;
- 5) формулировка показателей живучести, характеризующих чувствительность функциональных характеристик конструкции к степени ее поврежденности, определяемой сценариями накопления (развития) повреждений;
- 6) вычисление оценок структурной живучести.

Показатели и критерии структурной живучести силовых стержневых конструкций. Критерии и показатели живучести силовых конструкций сформулированы в терминах напряженного состояния и запасов прочности. Абсолютные S^a и относительные S^r показатели живучести, оцениваемые на каждом шаге последовательного разрушения структурных элементов, имеют вид

$$S^a = \sigma_e = \max \{ \sigma_T^d(t) \}_i, \quad (1)$$

$$S^r = n = \frac{\sigma_T(\sigma_{0,2})}{\max \{ \sigma_T^d(t) \}_i}, \quad S^r = n = \frac{R_y \gamma_c}{\max \{ \sigma_T^d(t) \}_i}, \quad (2)$$

где σ_e – эффективные напряжения; $\max\{\sigma_T^d(t)\}$ – максимальные динамические напряжения, полученные при численном анализе переходного процесса в течение времени его затухания t при i -м повреждении; n – фактический коэффициент запаса; $\sigma_T(\sigma_{0,2})$ – предел текучести; R_y – расчетное сопротивление стали растяжению, сжатию, изгибу по пределу текучести; γ_c – коэффициент условий работы.

Критерии живучести формулируются в виде

$$S^a < \sigma_T(\sigma_{0,2}), \quad S^a < R_y \gamma_c, \quad S^r > 1. \quad (3)$$

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

$$k = i_{\max} \left(\exists_{sol} \in SOL \left(\begin{matrix} S_i^a < \sigma_T(\sigma_{0,2}); S_i^r > 1 \\ S_i^a < R_y \gamma_c; S_i^r > 1 \end{matrix} \right) \right). \quad (4)$$

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 удастся найти), или последнему номеру шага разрушения, для которого удастся получить сходящееся численное решение при решении задачи в геометрически нелинейной постановке.

Предложенные методика, критерии, показатели апробированы при анализе повреждаемых конструкций телекоммуникационного контейнера и приставной мачты соединенных системой жестких связей (рис. 2), в условиях экстремальных условий нагружения, включающих в себя ветровые нагрузки VII ветрового района и инерционные нагрузки от сейсмического воздействия интенсивностью 9 баллов. Для каркаса контейнера проанализированы показатели живучести при поочередном (независимом) разрушении наиболее нагруженных структурных элементов (рис. 3, табл. 1).



Рис. 2. Телекоммуникационный контейнер с приставной мачтой

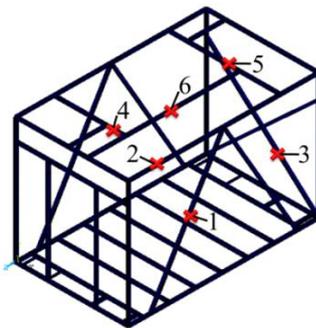


Рис. 3. Схема повреждений каркаса контейнера

Табл. 1. Показатели живучести каркаса контейнера

| Повреждение | S^a , МПа | 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 |

Для телекоммуникационной мачты рассматривается сценарий последовательного разрушения структурных элементов, основанный на предварительном статическом анализе НДС: на каждом шаге разрушению подвергается наиболее нагруженный структурный элемент (рис. 4). Каждый последующий шаг разрушения осуществляется после затухания колебаний, возникших вследствие разрушения на предыдущем шаге. Вследствие структурной избыточности (высокой степени статической неопределимости) и перераспределения силовых потоков в ходе накопления повреждений наблюдается немонотонный характер изменения показателей живучести (табл. 2, рис. 5).

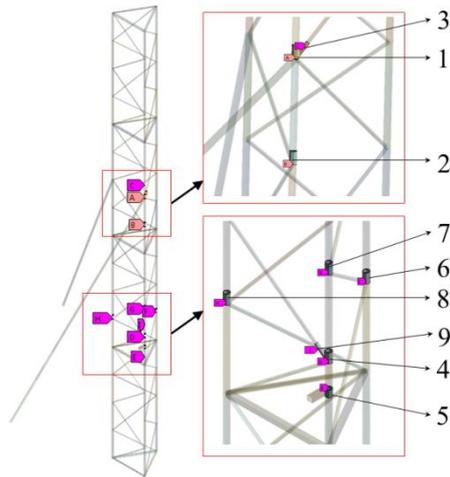


Рис. 4. Сценарий разрушения телекоммуникационной мачты: «1-9» – конечные элементы, к которым последовательно применяется технология РСЭ

Табл. 2. Показатели живучести телекоммуникационной мачты

| Повреждение | S^a , МПа | 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 |

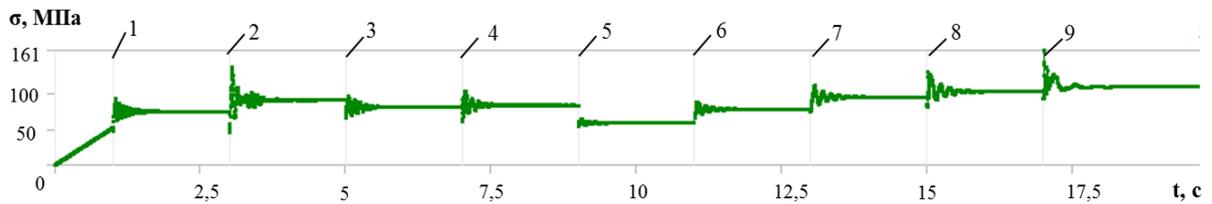


Рис. 5. Переходные процессы изменения максимальных напряжений в мачте при реализации сценария повреждения в соответствии с рис. 4: 1-9 моменты времени разрушения отдельных стержней

Критерии живучести выполняются на девяти шагах сценария ($k = 9$) – это последний шаг, на котором сохраняется конструкционная целостность.

Таким образом, установлено, что телекоммуникационные контейнер и мачта сохраняют работоспособность при рассматриваемых вариантах повреждения структуры.

Показатели и критерии структурной живучести колебательных систем стержневого типа. Для стержневых конструкций технических объектов, работоспособность которых определяется спектром собственных частот свободных колебаний, основные количественные показатели живучести S предлагается определять в натуральных или относительных величинах следующим образом:

$$\begin{aligned} S^a &= f_{1j} = h(d), & S^a &= f_{ij} = h(d), \\ S^r &= f_{1j}/f_{10} = h(d), & S^r &= f_{ij}/f_{i0} = h(d), \end{aligned} \quad (5)$$

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; $j=0, n_s$; n_s – количество возможных повреждений, принимаемых в рассмотрение в соответствии с некоторым сценарием их возникновения и развития; $h(d)$ – аппроксимирующие функции, определяемые расчетными или экспериментальными методами; d – степень поврежденности.

Количественные критерии живучести могут быть записаны в виде

$$\begin{aligned} S^a &> f^*, & S^a &> f_i^*, \\ S^r &> (f_{1j}/f_1)^*, & S^r &> (f_{ij}/f_i)^*. \end{aligned} \quad (6)$$

В качестве объекта анализа живучести рассматривается 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. Бак подвешивается с помощью системы композитных строп на силовой конструкции корпуса (СКК), представляющей собой цилиндрическую оболочку из углепластиковых стержней (рис. 6). СКК жестко крепится в нижней ее части на платформе космического

аппарата. Концы каждой группы из четырех строп крепятся в одном из двадцати четырех узлов крепления на силовой конструкции корпуса (рис. 6, в). При определении сценария исходили из результатов экспериментальных исследований силовой конструкции: в первую очередь повреждаются структурные элементы СКК в зоне крепления вант (рис. 7). Номера и количество разрушенных узлов в соответствии со схемой на рис. 6, в в каждом из сценариев содержатся в табл. 3.

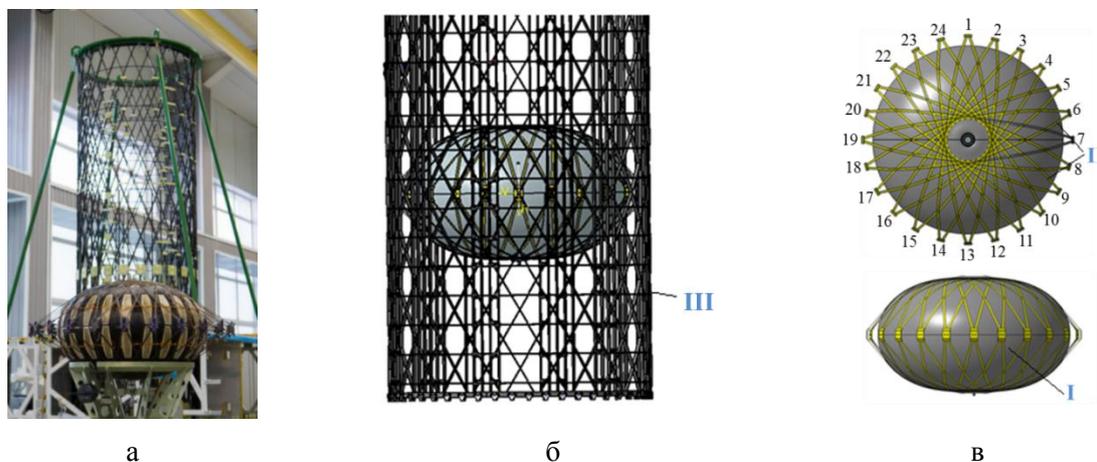


Рис. 6. Металлокомпозитный бак высокого давления:
а – общий вид бака (I) и СКК (III); б – расположение бака в СКК; в – схема крепления строп (II)

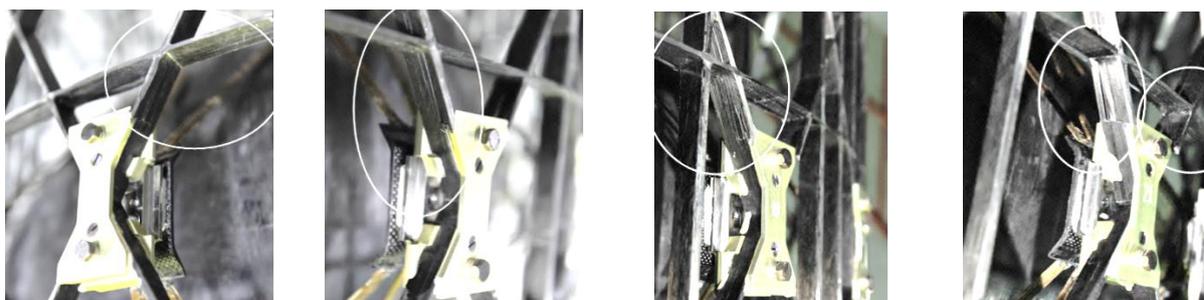


Рис. 7. Зоны разрушения СКК

Табл. 3. Сценарии разрушения связей

| Степень повреждения | I: независимое повреждение (осесимметричное) | II: накопительное повреждение (последовательное) |
|---------------------|--|--|
| 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 | - |

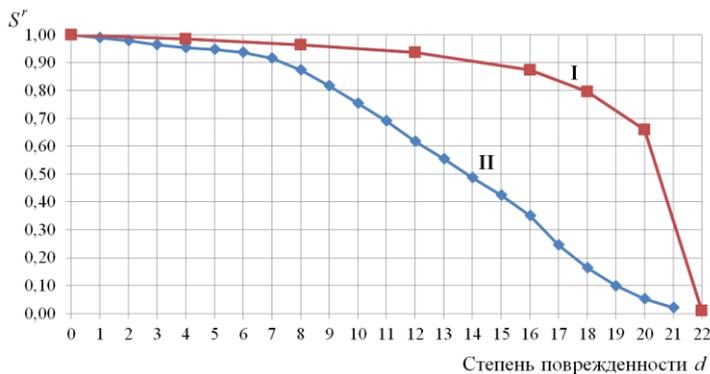


Рис. 8. Зависимости $S^r = f_{ij}/f_1 = h(d)$ для двух сценариев накопления повреждений

Как видно из полученных зависимостей, в I 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 снижаться,

при $d > 20$ падая практически до 0. Во II 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, установлено, что при регламентации недопустимых значений собственных частот свободных колебаний анализ живучести необходимо выполнять для II сценария накопления повреждений.

Показатели и критерии структурной живучести прецизионных конструкций стержневого типа. Количественные показатели живучести прецизионных конструкций рассматриваются на примере рефлектора параболической антенны наземных систем спутниковой связи (рис. 9). Показатели живучести в натуральных или относительных величинах предлагается определять следующим образом:

$$\begin{aligned} S^a &= u_{\max i} = h(d), & S^a &= \delta_i = h(d), \\ S^r &= \frac{u_{\max 0}}{u_{\max i}} = h(d), & S^r &= \frac{\delta_0}{\delta_i} = h(d), \end{aligned} \quad (7)$$

где $u_{\max i}$, δ_i – соответственно максимальное линейное отклонение и среднеквадратическое отклонение (с.к.о.) поверхности зеркала при i -ом повреждении каркаса; $u_{\max 0}$, δ_0 – соответственно максимальное линейное отклонение и с.к.о. поверхности зеркала при неповрежденном каркасе.

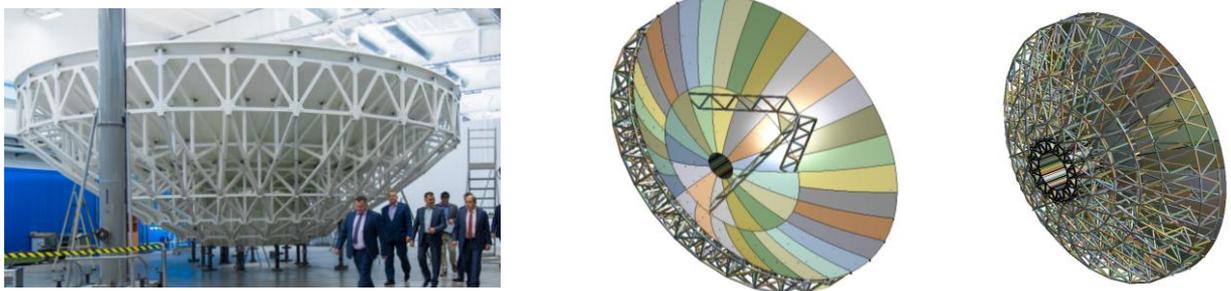


Рис. 9. Общий вид и геометрическая модель рефлектора

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

$$u_{\max i} < u_{\max}^*, \quad \delta_i < \delta^*. \quad (8)$$

В результате статического анализа НДС неповрежденной конструкции установлено, что наиболее нагруженными являются стержни каркаса в приступичной области, 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: удалению из расчетной схемы последовательно подвергаются 45 стержней верхнего яруса;

II – разрушение стержней нижнего яруса каркаса, расположенные в приступичной области: удалению из расчетной схемы последовательно подвергаются 45 стержней нижнего яруса;

III – разрушение стержней нижнего яруса, непосредственно соединенных с приопорной частью ступицы: удалению из расчетной схемы последовательно подвергаются 30 стержней.

Исходя из максимально допустимого отклонения формы зеркала $u_{\max}^* = 1,65$ мм получены расчетные зависимости δ и максимального отклонения поверхности зеркала от степени поврежденности d стержневого каркаса (рис. 10). На 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.

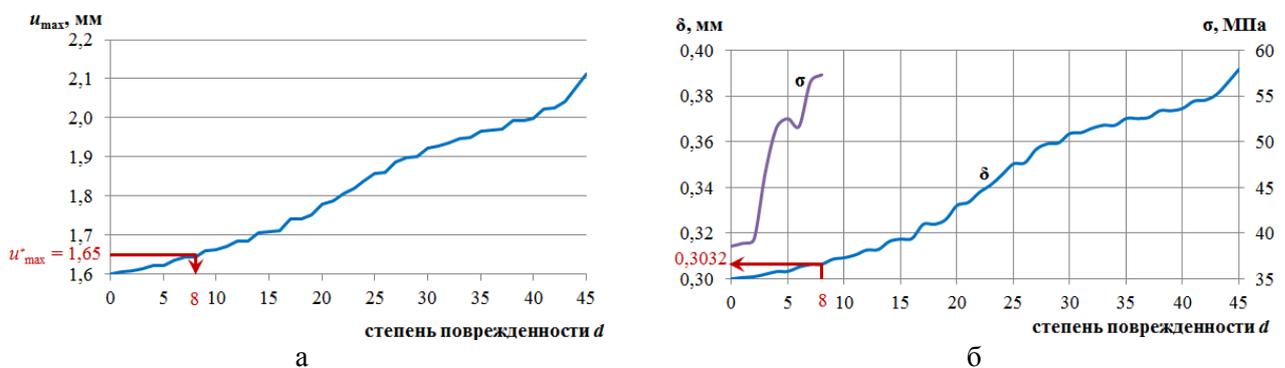


Рис. 10. Максимальное отклонение геометрии (а) и с.к.о., напряжения (б) зеркала в зависимости от степени поврежденности при реализации I сценария

Зависимости относительных показателей живучести от степени поврежденности (7) принимают вид, показанный на рис. 11.

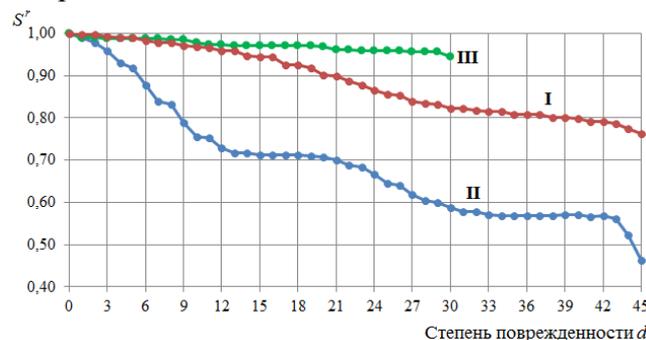


Рис. 11. Зависимости $S^r = \delta_0 / \delta_i = h(d)$ для трех сценариев разрушения

Таким образом, установлено, что повреждения стержней нижнего яруса каркаса в приступичной области вносят наибольший, а повреждения стержней нижнего яруса каркаса, непосредственно соединенных с приопорной частью ступицы, вносят наименьший вклад в снижение работоспособности прецизионной конструкции.

Четвертый раздел посвящен оценке живучести повреждаемых структурно-сложных узлов сочленения стержневых элементов. Предложена методика анализа живучести включающая в себя:

- 1) изучение состава и построение содержательной модели структуры конструкции;
- 2) установление связей структурных элементов, построение модели возможных их механических взаимодействий;
- 3) определение возможных повреждений взаимодействующих структурных элементов и

формулировка соответствующих условий прочности;

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

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

6) разработку логико-вычислительной модели анализа живучести конструкции и исследование возможности осуществления каждого из альтернативных сценариев накопления повреждений.

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. Конструкция полностью сохраняет свою работоспособность. Этот вариант реализуется при наличии структурной избыточности и резервировании. Вариант 2 – несколько (не менее двух) последовательных актов повреждения приводят к потере конструкционной целостности. Этот вариант означает разрушение, отложенное по времени. Вариант 3 – единственный акт локального повреждения приводит к потере конструкционной целостности. Это равносильно немедленному разрушению.

Предложен 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 конструкции, так и уровнем ее нагруженности в составе конкретного технического объекта. Очевидно, конструктивно идентичные объекты, 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, и n_3 – с третьим вариантом исхода. Потенциальный ранг определяется в диапазоне от 0 (конструкционная целостность не обеспечена при любом повреждении) до 1 (конструкционная целостность обеспечена при любых повреждениях) как средневзвешенная оценка рангов живучести на всем множестве возможных сценариев

$$Z = \frac{n_1 \cdot 1 + n_2 \cdot 0,5 + n_3 \cdot 0}{n_1 + n_2 + n_3}. \quad (9)$$

Апробация разработанной методики выполнена на примере типового узла сочленения структурных элементов пространственной стержневой конструкции. Узел включает в себя трубу и фитинг из полимерных композиционных материалов различной структуры, стальные обойму, болты и гайки (рис. 12, а). Несмотря на небольшое число конструктивных элементов (деталей), объединение их в систему осуществляется с помощью разнородных физико-технических связей: резьбовых и клеевых соединений, фрикционных взаимодействий. Это формирует высокую степень структурной неоднородности конструкции.

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.

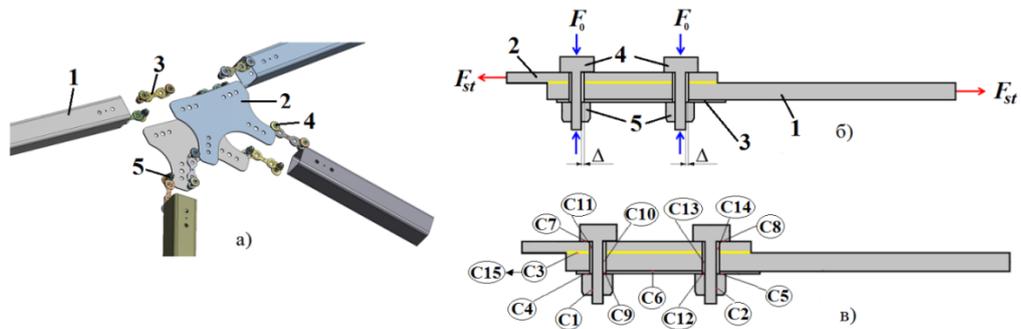


Рис. 12. Конструкция (а), расчетная схема (б) и структурная модель узла сочленения трубы с фитингом (в): 1 – труба (Т); 2 – фитинг (Ф); 3 – обойма (О); 4 – болт (Б); 5 – гайка (Г); C1, C2 – резьбовые соединения; C3 – клеевое соединение; C4-C15 – фрикционные взаимодействия; Δ – зазор

Испытанию подвергались два типа образцов: 1 – композитные детали соединены болтами (рис. 13, а); 2 – композитные детали склеены, две заклепки не являются силовыми и предназначены для удобства монтажа (рис. 13, б).



Рис. 13. Испытательные образцы болтового (а) и клеевого (б) соединений

В результате эксперимента установлена возможность следующих повреждений: смятие композитных деталей преднатяженными болтами (рис. 14, а); повреждения клеевого слоя и смещения деталей друг относительно друга (рис. 14, б); смятия и повреждения деталей болтами в направлении растягивающей силы (рис. 14, в).

С учетом этих повреждений обоснован сценарий многоуровневого процесса накопления повреждений, описываемый ориентированным графом, где вершины описывают состояния поврежденности, а дуги – отношения причинности между вершинами (рис. 15). С вершинами графа, описывающими повреждения, ассоциируются конструктивные элементы, в которых эти повреждения локализованы.

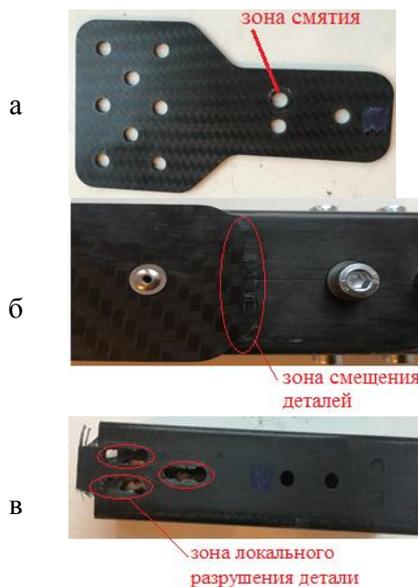


Рис. 14. Характерные повреждения композитных деталей

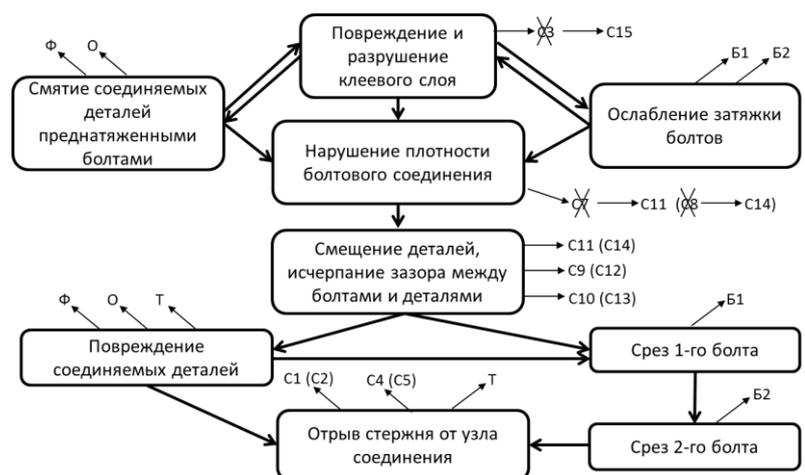


Рис. 15. Модель накопления повреждений узла сочленения

Вычислительная модель содержит пять условий, выполнение или невыполнение которых активизирует ту или иную ветвь/подветвь сценария (табл. 4):

Табл. 4. Условия выполнения или невыполнения ветвей сценария

| № условия в табл. 5 и на рис. 16, 17 | Формулировка условия | № условия в табл. 5 и на рис. 16, 17 | Формулировка условия |
|--------------------------------------|--|--------------------------------------|-------------------------|
| (1) | $\sigma < \sigma_{cr}^f, \sigma_{cr}^s, \sigma_{cr}^p$ | (4) | $\tau < \mu_s \cdot P$ |
| (2) | $\sigma_{glue} < \sigma_{glue_{cr}}$ | (5) | $\tau^b < \tau_{cut}^b$ |
| (3) | $\sigma^f, \sigma^s, \sigma^p, < \sigma_b$ | | |

Условия табл. 4 определяются следующими величинами: $\sigma_{cr}^f, \sigma_{cr}^s, \sigma_{cr}^p$ – соответственно прочность на смятие фитинга, обоймы, трубы; σ – максимальное эквивалентное напряжения в зоне контакта; σ_b – временное сопротивление разрушению материала; σ_{glue} – эквивалентные напряжения в клеевом слое; $\sigma_{glue_{cr}}$ – прочность клеевого слоя; μ_s – коэффициент трения покоя; τ – предельное касательное напряжение трения; P – нормальное контактное давление; τ^b – максимальное касательное напряжение в сечении болта; τ_{cut}^b – предел прочности материала болта на срез. Рассмотрение условий табл. 4 с учетом возможности их совместного осуществления в различных структурных элементах и связях приводит к множеству сценариев в соответствии с табл. 5.

Табл. 5. Варианты сценариев поврежденных состояний узла сочленения

| Сценарий, № | Выполнение условий | | | | | | | |
|-------------|--------------------|--------|-----|-----|-----|-------|-------|-------|
| | (1-1) | (1-1)* | (2) | (3) | (4) | (5-1) | (5-2) | (1-2) |
| 1 | Нет | Нет | – | – | – | – | – | – |
| 2 | Нет | Да | Да | Да | – | – | – | – |
| 3 | Да | – | Да | Нет | – | – | – | – |
| 4 | Да | – | Нет | Да | Да | – | – | – |
| 5 | Да | – | Нет | Нет | Да | – | – | – |
| 6 | Нет | Да | Да | Нет | – | – | – | – |
| 7 | Нет | Да | Нет | Да | Да | – | – | – |
| 8 | Нет | Да | Нет | Нет | Да | – | – | – |
| 9 | Нет | Да | Нет | – | Нет | Да | – | Да |
| 10 | Нет | Да | Нет | – | Нет | Нет | Да | Да |
| 11 | Нет | Да | Нет | – | Нет | Нет | Нет | – |
| 12 | Нет | Да | Нет | – | Нет | Нет | Да | Нет |
| 13 | Да | – | Нет | – | Нет | Да | – | Да |
| 14 | Да | – | Нет | – | Нет | Нет | Да | Да |
| 15 | Да | – | Нет | – | Нет | Нет | Нет | – |
| 16 | Да | – | Нет | – | Нет | Нет | Да | Нет |
| 17 | Нет | Да | Нет | – | Нет | Да | – | Нет |
| 18 | Да | – | Нет | – | Нет | Да | – | Нет |

Примечание: условие смятие деталей (1-1) головкой болта/гайкой и (1-2) стержнем болта; условие (5-1) срез 1-го болта и (5-2) срез 2-го болта.

Таким образом, принципиально возможными оказываются восемнадцать сценариев накопления повреждений, условия практического осуществления каждого из которых соотношения значений силовых факторов выясняется при исследовании построенной модели.

Практическая реализация вычислительной модели анализа живучести позволяет для определенного набора исходных данных (геометрии и свойств узла сочленения, действующих нагрузок) установить реализующийся при этих данных сценарий накопления повреждений, который можно интерпретировать как качественную характеристику живучести узла сочленения.

Так, при отсутствии повреждений визуализация сценария работы неповрежденной конструкции отражена схемой на рис. 16. А при реализации сценария № 8 накопления повреждений визуализация (рис. 17) показывает потерю конструкционной целостности вследствие возникновения двух событий повреждаемости при нарушении соответствующих условий прочности.

Результаты систематических расчетов выражены в виде расчетных зависимостей напряжений в деталях от величин F_0 и F_{st} . По результатам выполненного анализа построена диаграмма областей расчетных рангов живучести (рис. 18), 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.

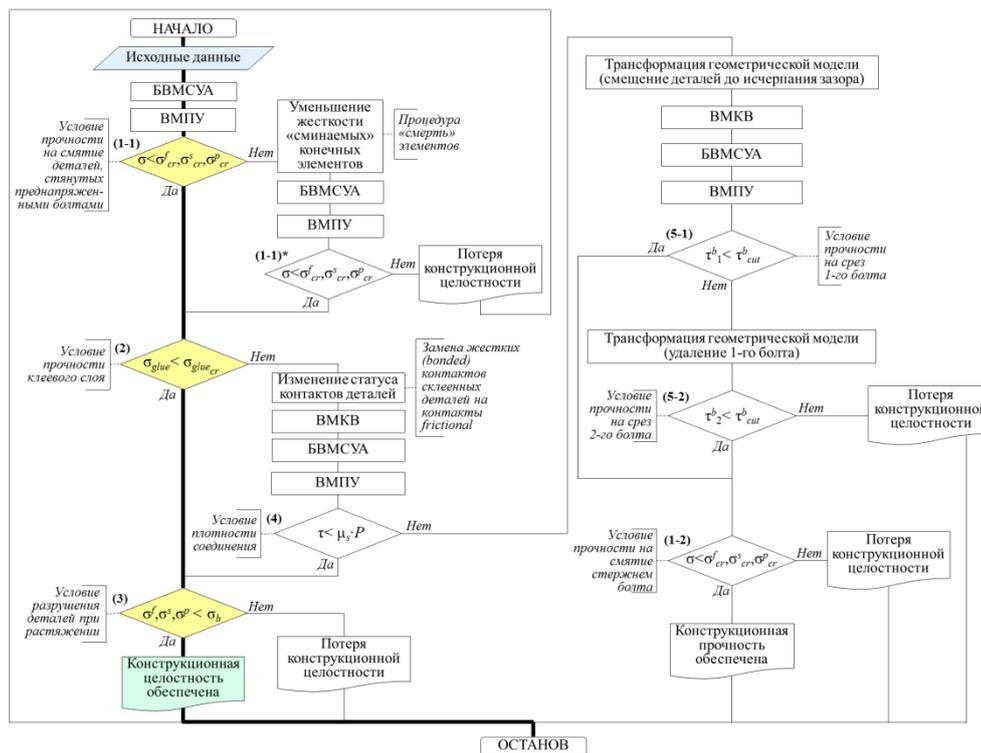


Рис. 16. Визуализация сценария работы неповрежденной конструкции

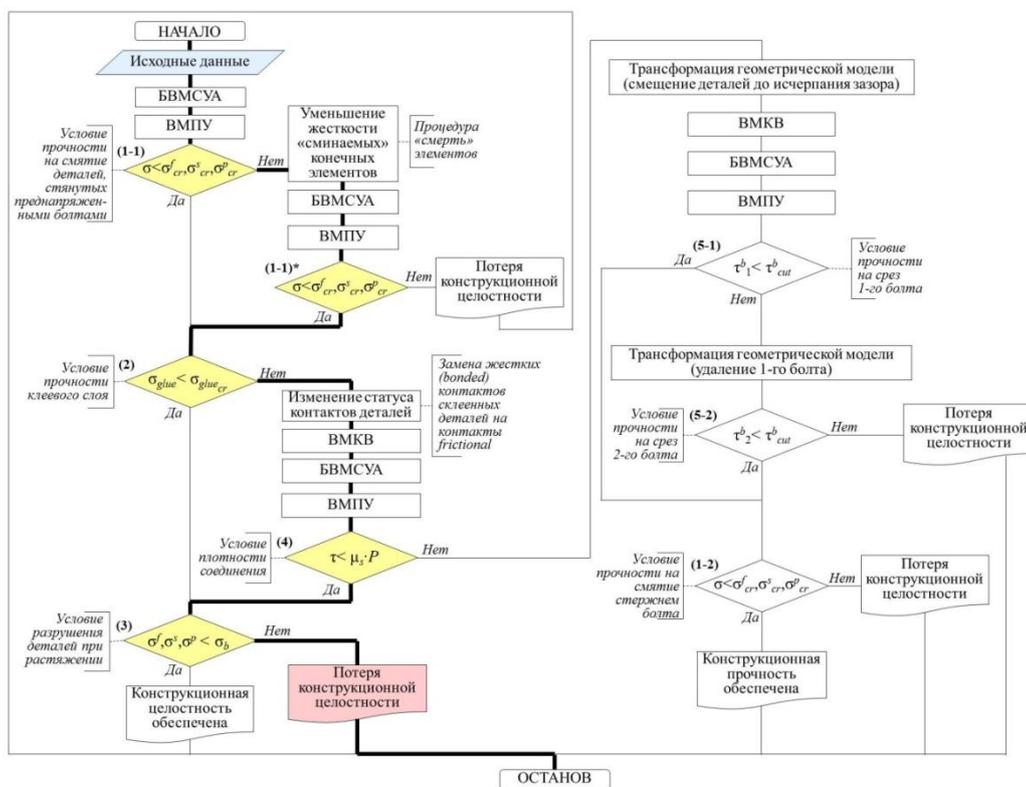


Рис. 17. Визуализация сценария № 8 накопления повреждений

Таким образом, при проведении вычислительных экспериментов для рассматриваемого структурно-сложного узла сочленения стержневых элементов установлены значения внутренних и внешних воздействий (усилия преднатяжения болтов и растягивающих сил в стержнях), соответствующие реализации разных вариантов развития повреждений.

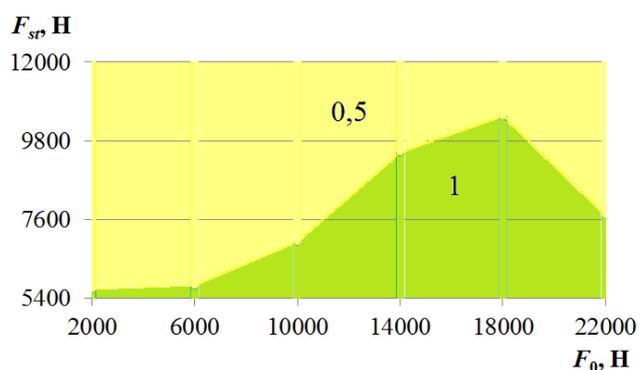


Рис. 18. Области расчетных рангов живучести

В приложения вынесены структурно-логические схемы сценариев аварийных разрушений стержневых конструкций, сценарии накопления повреждений в узле сочленения, акты о внедрении результатов исследования.

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 логико-вычислительная 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: силовые конструкции контейнера – 6 сценариев, мачты – 1 сценарий, колебательная система бака высокого давления электрореактивного двигателя космического аппарата – 2 сценария, силовой кар-

кас 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.

Основные результаты диссертационной работы отражены в следующих публикациях:

в изданиях, рекомендованных ВАК Минобрнауки РФ:

1. *Филиппова, Ю.Ф.* Оценка живучести структурно-сложных силовых конструкций на основе сценариев накопления повреждений / С.В. Доронин, Ю.Ф. Филиппова // Вестник Инженерной школы ДВФУ. – **2019**. – №4 (41). – С. 39-54. (70%)
2. *Буйницкая, Ю.Ф.* 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. (40%)
3. *Буйницкая, Ю.Ф.* 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. (40%)

индексируемых в базах данных Web of Science, Scopus

4. *Filippova, Yu.F.* Survivability assessment of damaged rod-type vibration systems / S.V. Doronin, Yu.F. Filippova // Journal of Physics: Conference Series. – **2020**. – Vol. 1441. – Art. 012093/ doi:10.1088/1742-6596/1441/1/012093. (60%)
5. *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. (60%)
6. *Filippova, Yu.F.* 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>. (60%)
7. *Filippova, Yu.F.* 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>. (30%)

в прочих изданиях:

8. *Филиппова, Ю.Ф.* 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. (60%)
9. *Филиппова, Ю.Ф.* Построение информационно-вычислительной метамоделли 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. (35%)
10. *Filippova, Yu.F.* 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. (60%)
11. *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. (100%)

12. 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. (100%)
13. *Филиппова, Ю.Ф.* 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. (30%)
14. *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. (100%)
15. *Буйницкая, Ю.Ф.* 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. (60%)
16. *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. (100%)
17. *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. (70%)
18. *Буйницкая, Ю.Ф.* Параметрические модели узлов сочленения элементов стержневых систем / Ю.Ф. Буйницкая // Сборник научных трудов II Всероссийской научно-технической конференции молодых ученых, аспирантов и студентов с международным участием «Высокие технологии в современной науке и технике». – Томск, **2013**. – Т.2 – С. 182-184. (100%)
19. *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. (100%)
20. *Буйницкая, Ю.Ф.* Численное моделирование сценариев разрушения телекоммуникационной мачты / Ю.Ф. Буйницкая // Институт машиноведения РАН им. А.А. Благодирова. XXIII Международная Инновационно-ориентированная конференция молодых учёных и студентов (МИКМУС-2011). – М: Изд-во ИМАШ РАН, **2011**. – С. 18. (100%)
21. *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. (100%)