
МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

DOI:10.25743/ICT.2023.28.4.006

Направления и результаты исследований в рамках реализации издательского проекта “Прочность. Механика разрушения. Ресурс. Безопасность технических систем”

В. В. Москвичев^{1,*}, Н. А. Чернякова¹, Е. В. Анискович¹, А. Е. Буров¹,
С. В. Доронин¹, А. М. Лепихин¹, Е. В. Москвичев¹, Е. М. Рейзмунт¹,
Е. Н. Федорова^{1,2}, Ю. Ф. Филиппова¹, А. П. Черняев³

¹Федеральный исследовательский центр информационных и вычислительных технологий, 660049, Красноярск, Россия

²Сибирский федеральный университет, 660041, Красноярск, Россия

³ООО Научно-исследовательский центр “СибЭРА”, 660062, Красноярск, Россия

*Контактный автор: Москвичев Владимир Викторович, e-mail: krasn@ict.nsc.ru

Поступила 18 мая 2023 г., доработана 09 июня 2023 г., принята в печать 23 июня 2023 г.

Представлены направления основных исследований, выполненных коллективом авторов в период с 1985 г. по настоящее время, результаты которых получили отражение в издательском проекте научных, научно-технических и прикладных разработок “Конструкционная прочность. Ресурс. Механика разрушения. Безопасность технических систем”. В рамках проекта опубликовано десять коллективных монографий. В обзорной форме отражены результаты исследований предельных состояний, характеристик трещиностойкости конструкционных материалов, композитных конструкций космических аппаратов, разработки в области создания машин и конструкций для условий Сибири и Арктики, приведены примеры результатов диагностики технического состояния и анализа причин аварий сложных технических систем. Отмечена приоритетная роль математического моделирования в решении обозначенных задач, особенно при анализе напряженно-деформированных состояний.

Ключевые слова: прочность, ресурс, механика разрушения, безопасность технических систем.

Цитирование: Москвичев В.В., Чернякова Н.А., Анискович Е.В., Буров А.Е., Доронин С.В., Лепихин А.М., Москвичев Е.В., Рейзмунт Е.М., Федорова Е.Н., Филиппова Ю.Ф., Черняев А.П. Направления и результаты исследований в рамках реализации издательского проекта “Прочность. Механика разрушения. Ресурс. Безопасность технических систем”. Вычислительные технологии. 2023; 28(4):57–72. DOI:10.25743/ICT.2023.28.4.006.

Введение

В последнюю четверть XX в. произошло существенное изменение парадигмы расчетного обоснования конструкционной прочности, ресурса и надежности сложных технических систем (СТС) с переходом к решению проблем живучести и безопасности. Данные трансформации обусловлены проявлением ряда факторов и развитием новых технологических методов анализа конструктивных решений на стадии проектирования СТС:

- создание уникальных крупногабаритных и наукоемких, с большим энергетическим разрушающим потенциалом, технических систем различного назначения (систем вооружения и ракетно-космических систем, атомной и тепловой энергетики, объектов оборонного, нефтегазового, химического и машиностроительного комплексов, гидротехнических сооружений, систем магистрального трубопроводного транспорта и т. д.);
- проявление дилеммы научно-технического прогресса, заключающейся в ускоренном развитии общества и техносферы, с одной стороны, и возникновении не существовавших ранее угроз человеку и природной среде со стороны объектов техносферы, приводящих к формулировке концепции “ненулевого риска аварий” и ставящих новые задачи защищенности объектов техносферы от возможного возникновения аварийных ситуаций;
- развитие методов и технологий математического моделирования при решении задач анализа напряженно-деформированных состояний (НДС) объектов с использованием численных методов (метода конечных элементов, модификаций конечно-разностных методов, бессеточных методов), создающих новые возможности формирования расчетных сеточных объемных моделей в сочетании с технологиями CAD/CAM/CAE, применением универсальных пакетов программ типа NASTRAN, ANSYS и др., разработки моделей цифровых двойников объектов и технологических процессов;
- развитие концепции теории риск-анализа и безопасности, расчетно-экспериментальных методов линейной и нелинейной механики разрушения, обеспечивших новые возможности анализа трещиностойкости конструкционных материалов и живучести элементов конструкций СТС при различных видах нагружения в сочетании с традиционными методами механики деформируемого твердого тела.

Основой такого понимания сложившейся ситуации является более чем 35-летний опыт фундаментальных исследований и прикладных работ в решении расчетно-экспериментальных и проектных задач создания, расчетов, проведения экспертиз технического состояния и анализа причин аварий СТС различного назначения. Отправной точкой работ стало создание по инициативе академика Ю.И. Шокина в 1986 г. в Вычислительном центре СО АН СССР (г. Красноярск) отдела проблем машиностроения. Организация отдела связывалась с перспективами исследований в области машиноведения при широком внедрении компьютерных технологий и развитии вычислительных методов как основы автоматизированного проектирования и моделирования для решения задач создания перспективных машин и конструкций.

1. Направления исследований и основные результаты

В решении задач конструкционной прочности, механики деформирования и разрушения, ресурса и безопасности можно выделить три направления и соответствующих им временных этапов исследований:

1. Проведение массовых испытаний образцов с трещинами малоуглеродистых и низколегированных сталей в широком диапазоне низких температур, обоснование критериев упругопластического разрушения, определение статистических функций распределения характеристик трещиностойкости и дефектности сварных конструкций, определение характеристик циклической и динамической трещиностойкости, разработка моделей вероятностной механики разрушения (1980–1990 гг.).

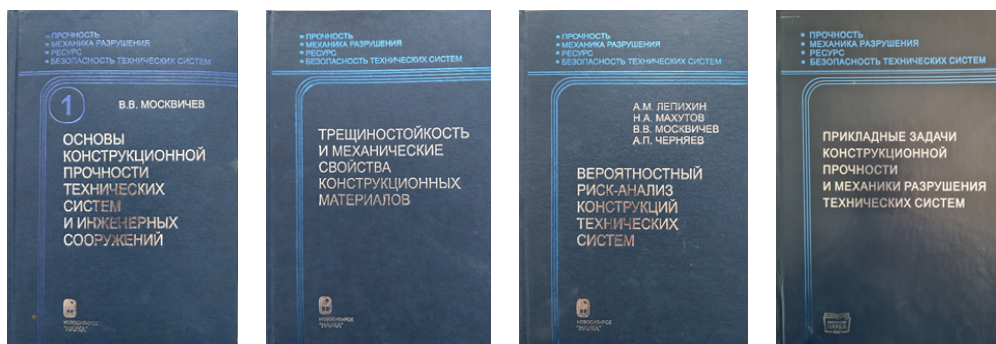
2. Решение задач конструкционной прочности, ресурса и надежности крупногабаритных машин, технологического оборудования и конструкций, разработка расчетно-экспериментальных методов механики разрушения и технологических методов обеспечения конструкционной прочности, создание автоматизированных систем проектирования изделий машиностроения (1986–2009 гг.). Наиболее значимые разработки и проекты второго этапа:
 - обобщение причин отказов, аварий и разрушений технических систем (ТС) различного назначения, в том числе эксплуатируемых в условиях Крайнего Севера, и формулировка основных, дополнительных и аварийных видов предельных состояний;
 - создание автоматизированной конечно-элементной системы “Прогноз прочности и ресурса” для проведения многокритериальных и многовариантных расчетов ТС;
 - развитие технологии ресурсного проектирования сварных конструкций с построением расчетных кривых усталости, функций надежности, вероятностных диаграмм живучести и ресурсных поверхностей;
 - обоснование методологии вероятностных расчетов по критериям механики разрушения и риск-анализа ТС по данным технической диагностики и расчетов показателей безопасности;
 - разработка нанопорошковых технологий повышения характеристик механических свойств и качества конструкционных материалов и изделий машиностроения;
 - практическая реализация технологий вычислительного моделирования, ресурсного проектирования, риск-анализа в сочетании с методами конструкционного материаловедения, технического диагностирования и физического эксперимента при решении задач безопасности ТС различного назначения (экскавационная и подъемно-транспортная техника, трубопроводные системы и сосуды давления, оборудование нефтехимического комплекса, тепловой и атомной энергетики, ферменные конструкции стартового комплекса “Байконур” и спутниковых систем, оборудование потенциально опасных и критически важных объектов);
 - реализация международного проекта с Американским обществом инженеров-механиков (ASME) “Разработка электронных учебных курсов для инженеров в Internet”.
3. Углубленные исследования в области безопасности ТС, включая развитие теорий надежности и риск-анализа, совершенствование методов и технологий конечно-элементного моделирования предельных, локальных и общих напряженно-деформированных состояний, аварийных ситуаций технических систем (2010–2023 гг.). Наиболее важные результаты этого периода:
 - оценка технического состояния и остаточного ресурса оборудования ГЭС Ангаро-Енисейского каскада, в том числе оценка риска аварий, разработка программ диагностирования технологического оборудования и методики оценки остаточного ресурса рабочих колес гидротурбин и их реализация на Красноярской ГЭС, экспертиза состояния статорных колонн гидроагрегатов Богучанской ГЭС;

- анализ причин аварии гидроагрегата на Саяно-Шушенской ГЭС, выполнение расчетно-экспериментальных оценок ресурса резьбовых соединений крышки гидротурбины в рамках работы комиссии РАН;
- комплексный анализ герметичности, прочности и долговечности ксеноновых металлокомпозитных баков высокого давления для апогейных двигателей космических аппаратов;
- разработка унифицированных моделей и алгоритмов численного моделирования напряженно-деформированных и предельных состояний (ПС), оценка несущей способности конструкций рефлекторов космического (диаметром до 5 м) и наземного (до 12 м) базирования с учетом реальных условий эксплуатации;
- разработка вычислительных моделей и алгоритмов технологии оценки показателей живучести повреждаемых конструкций и моделей ветвящихся и иерархических катастроф структурно-неоднородных систем;
- исследование региональных проблем природно-техногенной безопасности с разработкой технологий оценки территориального риска в интересах устойчивого развития, включая геодинамические и антропогенные риски урбанизированных территорий, корректировку карт общего сейсмического районирования.

Результаты по отдельным направлениям исследований обобщены в [1–6].

2. Издательский проект “Прочность. Механика разрушения. Ресурс. Безопасность технических систем”

Значительная часть результатов указанных выше направлений исследований представлена в 10-томной серии монографий издательского проекта по выпуску учебной, научно-производственной и научной литературы “Прочность. Механика разрушения. Ресурс. Безопасность технических систем”, реализуемого с 2002 г. [7–18] под общей редакцией академика В.П. Ларионова, члена-корреспондента РАН Н.А. Махутова, профессора В.В. Москвичева, академика Ю.И. Шокина при финансовой поддержке Научно-исследовательского центра “СибЭРА” (генеральный директор, к. т. н. А.П. Черняев). Основная часть монографий написана авторским коллективом из сотрудников отдела проблем машиностроения и выпускников кафедр “Динамика и прочность машин” и “Диагностика и безопасность технических систем” Красноярского государственного технического университета (см. рисунок).



Оформление монографий издательского проекта
Design of monographs of a publishing project

В монографиях проекта приведены результаты многолетней работы авторов по программам фундаментальных исследований РАН и федеральным целевым программам Минобрнауки РФ, проектам Российского фонда фундаментальных исследований, по техническим заданиям на НИОКР с рядом ведущих машиностроительных предприятий и научно-исследовательских организаций. Ниже дано фрагментарное представление отдельных результатов, ряд которых отражен в перечнях важнейших достижений АН СССР и РАН.

2.1. Анализ предельных состояний СТС

Для проведения расчетных оценок безопасного ресурса конструкций с учетом влияния технологических дефектов и эксплуатационных повреждений выделены три группы характерных типов предельных состояний [8, 17] (см. таблицу).

В общем случае расчетные уравнения для указанных предельных состояний содержат параметры напряжений σ , деформаций e , размеры дефектов l , характеристики статической (K_c, J_c, K_{ce}) и циклической (C, n) трещиностойкости материалов:

$$\Phi(\sigma, e, l, K_c, J_c, K_{ce}, C, n) = 0. \quad (1)$$

С целью учета эксплуатационных факторов в уравнениях предельных состояний для элементов конструкций вводятся геометрические характеристики размеров сечений (масштабный фактор), параметры условий эксплуатации (эксплуатационный фактор — давление, температура, параметры, учитывающие влияние среды и физико-механических воздействий), коэффициенты, отражающие влияние технологии изготовления (технологический фактор — остаточные и монтажные напряжения, чистота обработки, термообработка и опрессовка изделий и т. д.). Расчеты по уравнениям (1) проводятся в детерминированной или вероятностной постановке. В первом случае задачи количественной оценки трещиностойкости и живучести ТС решаются в рамках расчетно-

Типы предельных состояний
Types of limit states

Основные	Дополнительные
ОПС1 — нарушение прочности эксплуатируемых конструкций при максимальных нагрузках (статическое и динамическое нагружение)	ДПС1 — разрушения типа хрупкого, квазихрупкого, вязкого от технологического дефекта или трещины
ОПС2 — нарушение нормальной эксплуатации при возникновении усталостных трещин (циклическое нагружение)	ДПС2 — образование и развитие трещин мало- или многоциклового усталости
ОПС3 — развитие недопустимых пластических деформаций	ДПС3 — образование и развитие трещин коррозионно-механического характера
ОПС4 — общая или местная потеря устойчивости	

Предельные состояния аварийных ситуаций

АПС1 — вязкие или хрупкие разрушения с экстремальным падением несущей способности (на 50–90 %)

АПС2 — циклические разрушения с экстремальным падением долговечности (на 1–2 порядка и более)

АПС3 — разрушение от действия вторичных факторов развивающихся аварийных ситуаций

АПС4 — тепловые повреждения от первичных и вторичных поражающих факторов

экспериментального комплекса механики разрушения [8, 17]. В случае вероятностных постановок развиваются методы, основанные на интеграции критериев механики разрушения и теории надежности ТС. Так как параметры уравнения (1) — случайные переменные, возможность достижения предельного состояния оценивается вероятностной мерой — функцией риска разрушения $R_f(t)$, которая определяется как вероятность достижения предельного состояния на заданном сроке эксплуатации t :

$$R_f(t) = P\{\Phi(x, t) = 0\} = 1 - \exp\left(-\sum_{\Phi} \int_c \lambda_{\Phi}(t) dt\right).$$

Здесь λ_{Φ} — интенсивность возникновения предельных состояний заданного типа.

Безопасный ресурс конструкции определяется как среднее время T , за которое она достигает заданного предельного состояния:

$$T = \int_0^{\infty} t f(t) dt = \int_0^{\infty} (1 - F(t)) dt,$$

где $f(t)$, $F(t)$ — плотность вероятностей и функция распределения наработки до отказа по заданному предельному состоянию соответственно.

Развитие этой идеологии дает возможности для рассмотрения и решения задач безопасности ТС, разработки и реализации методов риск-анализа ТС [1, 10, 17].

2.2. Исследования характеристик трещиностойкости конструкционных материалов

Для оценки параметров предельных состояний были проведены испытания конструкционных материалов на статическую и циклическую трещиностойкость [7, 9, 15]. В первую очередь исследовались характеристики упругопластического разрушения малоуглеродистых и низколегированных сталей с оценкой влияния масштабного фактора, схем нагружения, условий эксплуатации (температуры, скорости нагружения). В ходе исследований получены функции распределения критических значений J -интеграла J_c и коэффициента интенсивности деформаций K_{ce} в упругопластической области. Установлены функциональные взаимосвязи этих характеристик, что упрощает анализ предельных состояний. Разработана методика расчета на трещиностойкость элементов конструкций с использованием J -интеграла.

Проведены статистические исследования характеристик статической и циклической трещиностойкости различных зон сварных соединений с оценкой влияния температуры эксплуатации. В результате получены соответствующие функции распределения вероятностей для конструкционных сталей широкого применения — Ст3, 09Г2С, 10ХСНД и др. Проведено обобщение диаграмм циклического разрушения малоуглеродистых и низколегированных сталей на среднеамплитудном участке нагружения, характерном для исследованных конструкций, в том числе для трещин, развивающихся в зонах концентривных концентраторов напряжений.

Выполнен комплекс исследований по оценке сопротивления слоистому растрескиванию листового проката и сварных соединений малоуглеродистых и низколегированных сталей. Показано, что основной причиной низкого сопротивления слоистому растрескиванию являются неметаллические включения. Определены характеристики трещиностойкости конструкционных материалов при динамическом распространении трещин.

Обобщены результаты испытаний на трещиностойкость плакированных сталей. Показано, что на границе раздела основного металла и металла плакировки происходит скачкообразное изменение трещиностойкости.

Выполнены обширные исследования характеристик статической трещиностойкости алюминиевых сплавов, структуры, свойств и трещиностойкости бороалюминиевого композиционного материала, конструкционной керамики на основе оксида алюминия.

2.3. Расчетно-экспериментальная оценка прочности композитных конструкций космических аппаратов

Исследования в этом направлении выполнялись в рамках проектов федеральной целевой программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014–2021 годы» во взаимодействии с АО «Информационные спутниковые системы им. М.Ф. Решетнева». Расчетно-экспериментальные обоснования были выполнены для металлокомпозитных баков высокого давления (МКБВД), используемых в электрореактивных двигательных установках космических аппаратов, рефлекторов космических и наземных антенн, ферменных конструкций космических аппаратов из бороалюминиевого композита [9, 16, 17, 19].

Конструкция МКБВД представляет собой эллипсоидную оболочку вращения, состоящую из тонкостенного титанового лайнера и композитной оболочки. Выполнен анализ конструкторских, технологических, научно-технических и экспериментальных проблем и задач обеспечения прочности, герметичности, ресурса, надежности и безопасности. Комплекс исследовательских задач включал расчетно-экспериментальный анализ НДС и предельных состояний, разработку моделей деформирования и разрушения, определение характеристик механических свойств материалов, критических давлений нарушения герметичности и разрушений, оценку фактических коэффициентов запасов прочности МКБВД.

Для исследования особенностей деформирования и разрушения МКБВД осуществлены уникальные пневматические испытания баков с проведением визуального, измерительного и акустико-эмиссионного контроля их состояния, вплоть до момента разрушения. Методика экспериментальных исследований включала испытания на прочность до разрушения при кратковременном статическом нагружении и ресурсные испытания при длительном статическом и циклическом нагружении. Испытано 19 образцов МКБВД до разрушения.

Численный анализ НДС выполнен на основе конечно-элементной модели сегмента конструкции бака, включающего герметизирующий лайнер и силовую композитную оболочку. Исследованы особенности прогрессирующего разрушения композитной оболочки, механизмы накопления повреждений, процессы деформирования и условия наступления предельных состояний. Результаты численного моделирования оказались в полном соответствии с данными натурных испытаний баков.

Для крупногабаритного композитного рефлектора зеркальной антенны диаметром до 12 м для наземных систем связи основная цель работы заключалась в анализе НДС и проведении оптимизации конструктивных решений для обеспечения требований стабильности геометрии рабочей поверхности зеркала. При исследовании НДС были решены следующие задачи: анализ стационарной теплопроводности в условиях радиационно-конвективного теплообмена, внешней аэродинамики и упругого деформирования сегмента зеркала и силового каркаса; анализ собственных частот и форм колебаний;

моделирование состояния конструкции при действии ветрового потока разного напора, вибрационных и механических воздействий; анализ живучести типовых соединений узлов силового каркаса.

Прецизионный трансформируемый ассиметричный параболический рефлектор диаметром до 5 м представляет собой зонтичную конструкцию с шарнирно закрепленными спицами из композиционного материала на основе углепластика.

Пределным состоянием является превышение среднеквадратического отклонения (СКО) геометрии рабочей поверхности рефлектора от теоретического профиля более 0.3 мм. Отказом является превышение СКО геометрии рабочей поверхности от теоретического профиля более 0.5 мм.

Выполнены следующие работы:

- проведены испытания по определению физико-механических свойств используемых композиционных материалов в рабочем диапазоне температур от -150 до $+125$ °С;
- проведены испытания по определению функциональных свойств композиционного материала с памятью формы и определены технологические параметры шпангоута, оптимальные для его активации;
- проведены исследования геометрической стабильности рефлектора при внешних механических и температурных воздействиях, статической и динамической прочности рефлектора, включая расчет НДС, определение собственных частот и форм колебаний;
- выполнены прогнозные оценки ресурса и параметров надежности, установленных техническими требованиями;
- на основе исследований геометрической стабильности обоснованы предложения по оптимизации конструкции рефлектора;
- проведен численный кинематический анализ рефлектора, определены законы движения звеньев кинематической модели при раскрытии антенны.

Численное конечно-элементное моделирование статических, динамических, кинематических, теплофизических, гравитационных и других видов воздействий и состояний технических систем открывает новые возможности для создания уникальных конструкций из композитных материалов, что позволит обосновать требуемые уровни их прочности, ресурса, надежности и безопасной эксплуатации.

2.4. Проблемы создания техники для эксплуатации в условиях Сибири и Арктики

Ускоренное освоение Сибири и Арктики, направленное на усиление экономического потенциала России, означает развитие ряда базовых отраслей промышленности, соответствующей инфраструктуры, создания нового поколения машин и конструкций, отвечающих экстремальным условиям эксплуатации. Данная проблема рассматривалась и решалась с позиций конструкционного материаловедения, разработки конструктивных решений и форм повышенной хладостойкости, разработки методов расчетов на сопротивление хрупкому и квазихрупкому разрушению, проведения экспериментальных исследований характеристик трещиностойкости и конструкционных сталей [7, 8, 15, 17, 18].

Основой разработанных расчетных методик низкотемпературной прочности машин и конструкций стали результаты исследований низкотемпературных зависимостей значений ударной вязкости, коэффициентов интенсивности напряжений, энергетического

критерия J -интеграла. Это позволило решить ряд прикладных задач и дать рекомендации по конструктивным решениям элементов подъемно-транспортной, экскавационной, горнотранспортной техники, обоснованному выбору конструкционных сталей, сформулировать основные направления развития исследований и нормативной базы проектирования, производства и эксплуатации техники северного исполнения [17, 18].

2.5. Диагностика и экспертиза аварий технических систем

Наиболее значимые наукоемкие работы по оценке технического состояния были выполнены для гидротурбинного оборудования Красноярской ГЭС по данным диагностики повреждений рабочих колес двенадцати гидроагрегатов, включая оценку остаточного ресурса с использованием характеристик трещиностойкости и классических методов расчетов на усталость (2014–2020 гг.) [17]. Статистический анализ эксплуатационной дефектности коррозионно-механического и кавитационного происхождения позволил обосновать критические размеры дефектов и определить уровень остаточного ресурса каждого рабочего колеса гидроагрегатов. В процессе выполнения работ использовались следующие методы технической диагностики: визуально-измерительный контроль, капиллярная дефектоскопия, ультразвуковая толщинометрия, измерения твердости металла, ультразвуковой контроль сварных соединений и лопастей рабочих колес, металлографические исследования, определение характеристик механических свойств после 40 лет эксплуатации. Были подготовлены экспертные заключения и рекомендации по срокам и режимам дальнейшей эксплуатации.

Аналогичные по содержанию работы выполнялись при анализе причин трещинообразования в колоннах статора Богучанской ГЭС, экспертизе крупногабаритных сосудов высокого давления, резервуаров для хранения нефтепродуктов, технологических трубопроводных систем с использованием метода акустической эмиссии, технических систем и машин различного назначения.

Причины катастрофических разрушений и последствий анализировались в случае аварии на гидротурбине второго агрегата Саяно-Шушенской ГЭС (2009–2010 гг.) и разрушения резервуара РВС-30000 в АО «Норильско-Таймырская энергетическая компания» (2020 г.).

В первом случае на базе анализа напряженно-деформированных состояний и данных о нагрузках и воздействиях выполнены модельные расчеты долговечности соединения крышки со статором гидротурбины. Были определены режимы нагружения, вносящие основной вклад в уровень повреждений — циклы пуск–остановка гидроагрегата и регулирования мощности на переходных режимах. Расчеты на усталость осуществлялись на основе гипотезы линейного суммирования повреждений. Получены значения ресурса шпилек соединения крышки и статора для различных режимов нагружения на основе диаграмм малоциклового усталости и циклического развития трещин в шпильках. Расчеты позволили обосновать причинно-следственные связи уровней и режимов нагруженности, механизмов усталостного разрушения и условия полного исчерпания ресурса соединительных элементов, послуживших источниками катастрофического разрушения гидроагрегата [17].

Во втором случае технологии математического моделирования позволили с использованием данных неразрушающего контроля установить технические причины аварии, выявить причинно-следственные связи, восстановить сценарную последовательность

развития этапов аварии, разработать мероприятия и предложения. Исследования НДС, проведенные методом конечных элементов, включали построение полной модели резервуара и разрушенного основания, оценку условий потери устойчивости, анализ НДС в штатном и аварийном состояниях при различных уровнях заполнения резервуара. Определены деформации и эквивалентные напряжения во всех поясах резервуара на различных стадиях развития аварии, что позволило установить причину ее возникновения как результат частичного разрушения свайного поля основания.

3. Общие выводы

Разнообразие объектов технических систем, многоаспектность расчетно-экспериментальных результатов, представленных в монографиях, системный анализ проблем и направлений перспективных задач и разработок в области машиностроения и машиноведения, механики разрушения и безопасности позволяют наметить пути дальнейших исследований.

Главной задачей должно стать преодоление устойчивой тенденции разрыва между фундаментальными исследованиями и разработками в области прочности, надежности и ресурса и их практической реализацией в гражданском машиностроении и оборонно-промышленном комплексе. Уровень качества большинства изделий российского машиностроения не удовлетворяет современным требованиям и не обеспечивает их конкурентоспособность на мировом рынке.

На стадии проектирования изделий исследования целесообразно сосредоточить на обеспечении конструкционной прочности машин по отношению к отказам механического происхождения: разрушению, возникновению недопустимых пластических деформаций, образованию трещин, зон повышенного износа и дефектов коррозионного происхождения. Это требует детального анализа причинно-следственного и расчетно-экспериментального комплексов обеспечения прочностных и ресурсных характеристик технических систем. В этих условиях важное значение приобретают взаимосвязанные исследования в рамках теорий надежности, механики разрушения и теории катастроф с позиций обеспечения безопасности технических систем, включая риск-анализ аварийных ситуаций.

В настоящее время разработаны методы оценки трещиностойкости конструкционных материалов, намечены пути создания конструкций, обладающих повышенной живучестью при наличии трещин. Применение адекватных моделей роста трещин расширяет практику эксплуатации конструкций и машин по техническому состоянию с оценкой остаточного ресурса и назначением периодичности освидетельствования и диагностирования. Дальнейшее развитие методов механики разрушения позволит на практике обеспечить повышение конструкционной прочности и надежности технических систем различного назначения в экстремальных условиях эксплуатации. Важная для России проблема повышения надежности машин, работающих в условиях Сибири и Арктики, также в значительной степени может быть решена с использованием методов механики разрушения.

Прогресс в области создания технических систем в значительной степени основан на широком применении современных методов моделирования в рамках возможностей прикладной и вычислительной математики. Прогнозирование прочности и ресурса требует максимального приближения расчетных схем к реальным объектам и условиям их эксплуатации. Конечно-элементное моделирование при оценках напряженно-деформи-

рованных состояний стало основным и необходимым инструментарием вычислительной механики разрушения при анализе несущей способности, прочностных, ресурсных и надежностных показателей технических систем.

В начале 2000-х гг. обозначилось смещение в области традиционной научной активности представлений конструкционной прочности и ресурса в сторону решения задач безопасности технических систем и объектов. Экспериментальные и расчетные методы механики разрушения наряду с методами технической диагностики и неразрушающего контроля оказались востребованными при подготовке нормативно-технических документов по оценке остаточного ресурса объектов технического регулирования, потенциально опасных, критически важных и стратегических объектов.

Дальнейшее развитие механики разрушения, по мнению авторов, будет активно продолжаться в таких направлениях, как:

- вероятностная механика разрушения с выходом на теорию анализа рисков аварийных ситуаций;
- динамическая механика разрушения с анализом высокоскоростных процессов разрушения;
- механика разрушения сварных конструкций;
- структурная механика разрушения композитных и структурно-неоднородных материалов на макро- и микроуровнях;
- механика квазихрупкого, циклического и коррозионного разрушения;
- вычислительная механика разрушения, предполагающая развитие аналитических и численных методов анализа НДС в локальных зонах дефектов и вершинах трещин и методов моделирования конструкций с трещинами;
- приложения механики разрушения к отдельным типам конструкций, машин и оборудования.

Перспективными направлениями научных исследований проблем прочности, надежности и ресурса, оказывающими наибольшее влияние на развитие машиностроения, представляются следующие:

1. Разработка и развитие методов проектирования, расчетов и программного обеспечения, в первую очередь применительно к объектам с повышенными требованиями к эксплуатационной надежности и безопасности.
2. Научное обоснование, создание и широкое внедрение эффективных систем мониторинга машин и конструкций, особенно подвергаемых воздействиям высоких механических напряжений, вибраций, температур, повышенному износу и коррозии, создание и организация производства диагностических средств, испытательных стендов, оборудования и приборов общепромышленного применения для использования в производственных и эксплуатационных условиях.
3. Создание с учетом международного опыта нового поколения научно обоснованной нормативно-технической документации по направлению “Расчеты и испытания на прочность в машиностроении”.
4. Разработка комплексных критериев надежности, долговечности, прочности, износостойкости и материалоемкости технических систем, необходимых для создания новой методологии проектирования и научного обоснования норм прочности и надежности изделий гражданского и специального машиностроения, а также допустимости дефектов для наиболее ответственных объектов техники с учетом живучести и безопасности.

В современных условиях машиностроительного производства значительная роль отводится цифровым промышленным технологиям. Основные приложения в этой области, по мнению авторов, будут развиваться в следующих направлениях:

- высокоавтоматизированное управление всеми аспектами деятельности промышленного предприятия;
- интегрированное высокоавтоматизированное управление созданием товарной продукции на всех этапах жизненного цикла (проектирование, производство, эксплуатация);
- интеграция, хранение и интерпретация информационных потоков от источников данных, включая контроллеры АСУТП, сенсоры, программные приложения с использованием моделей цифровых двойников;
- создание и широкое применение систем мониторинга технического состояния промышленного оборудования, технических систем и инженерных сооружений.

Полученные результаты по всем направлениям и объектам нашли практическое приложение, что вселяет уверенность в полезности данного издательского проекта при решении задач прочности, ресурса, надежности и безопасности технических систем различного назначения и позволяет расширить наши возможности в достижении успешных результатов в инженерно-проектной деятельности при создании образцов новой техники.

Благодарности. Работа выполнена в рамках государственного задания Минобрнауки России для Федерального исследовательского центра информационных и вычислительных технологий.

Список литературы

- [1] Москвичев В.В., Буров А.Е., Доронин С.В., Лепихин А.М. Проблемы конструкционной прочности и безопасности технических систем. Красноярск: ИВМ СО РАН; 2006: 100.
- [2] Москвичев В.В. Расчетно-экспериментальные методы повышения конструкционной прочности и безопасности технических систем. Вычислительные технологии. 2003; 8(Спецвыпуск):5–13.
- [3] Москвичев В.В., Чернякова Н.А. Проблемы и перспективные технологии машиностроительного комплекса в формате регионального развития. Журнал СФУ. Техника и технологии. 2019; 12(8):890–902.
- [4] Шокин Ю.И., Буров А.Е., Доронин С.В., Крушенко Г.Г., Лепихин А.М., Москвичев В.В., Черняев А.П. Модельные расчеты прочности и разрушения конструкций технических систем. Вычислительные технологии. 2004; 9(Спецвыпуск):101–110.
- [5] Лепихин А.М., Москвичев В.В., Доронин С.В. Надежность, живучесть и безопасность сложных технических систем. Вычислительные технологии. 2009; 14(6):58–70.
- [6] Москвичев В.В., Лепихин А.М., Буров А.Е., Доронин С.В., Москвичев Е.В. Расчетно-экспериментальная оценка прочности и предельных состояний композитных конструкций космических аппаратов. Космические аппараты и технологии. 2019; 3(29):140–148.
- [7] Москвичев В.В., Махутов Н.А., Черняев А.П., Букаемский А.А., Буров А.Е., Зырянов И.А., Козлов А.Г., Кокшаров И.И., Крушенко Г.Г., Лепихин А.М.,

- Мишин А.С., Москвичева Л.Ф., Федорова Е.Н., Цыплюк А.Н.** Трещиностойкость и механические свойства конструкционных материалов технических систем. Новосибирск: Наука; 2002: 334.
- [8] **Москвичев В.В.** Основы конструкционной прочности технических систем и инженерных сооружений Ч. 1: Постановка задач и анализ предельных состояний. Новосибирск: Наука; 2002: 106.
- [9] **Буров А.Е., Кокшаров И.И., Москвичев В.В.** Моделирование разрушения и трещиностойкость волокнистых металлокомпозитов. Новосибирск: Наука; 2003: 173.
- [10] **Лепихин А.М., Махутов Н.А., Москвичев В.В., Черняев А.П.** Вероятностный риск-анализ конструкций технических систем. Новосибирск: Наука; 2003: 174.
- [11] **Доронин С.В., Лепихин А.М., Москвичев В.В., Шокин Ю.И.** Моделирование прочности и разрушения несущих конструкций технических систем. Новосибирск: Наука; 2005: 250.
- [12] **Степнов М.Н.** Вероятностные методы оценки характеристик механических свойств материалов и несущей способности элементов конструкций. Новосибирск: Наука; 2005: 342.
- [13] **Махутов Н.А.** Конструкционная прочность, ресурс и техногенная безопасность: В 2 ч. Ч. 1: Критерии прочности и ресурса. Новосибирск: Наука; 2005: 494.
- [14] **Махутов Н.А.** Конструкционная прочность, ресурс и техногенная безопасность: В 2 ч. Ч. 2: Обоснование ресурса и безопасности. Новосибирск: Наука; 2005: 610.
- [15] **Москвичев В.В., Крушенко Г.Г., Буров А.Е., Усков И.В., Федорова Е.Н.** Нанопорошковые технологии в машиностроении; отвю ред. Н.А. Махутов. Красноярск: Изд-во СФУ; 2013: 186.
- [16] **Москвичев В.В., Тестоедов Н.А., Васильев В.В., Халимонович В.И., Лепихин А.М., Анискович Е.В., Буров А.Е., Головенкин Е.Н., Доронин С.В., Еремин Н.В., Левко В.А., Москвичев Е.В., Похабов Ю.П., Разин А.Ф., Синьковский Ф.К., Филиппова Ю.Ф., Черняев А.П., Чернякова Н.А.** Несущая способность и безопасность металлокомпозитных баков космических аппаратов. Новосибирск: Наука; 2021: 440.
- [17] **Москвичев В.В., Махутов Н.А., Шокин Ю.И., Лепихин А.М., Анискович Е.В., Буров А.Е., Гаденин М.М., Готовко С.А., Доронин С.В., Кашубский Н.И., Москвичев Е.В., Москвичева Л.Ф., Рейзмунт Е.М., Суходоева Н.В., Федорова Е.Н., Филиппова Ю.Ф., Чабан Е.А., Черняев А.П., Чернякова Н.А.** Прикладные задачи конструкционной прочности и механики разрушения технических систем. Новосибирск: Наука; 2021: 796.
- [18] **Фортов В.Е., Махутов Н.А., Москвичев В.В., Фомин В.М.** Машиностроение России: техника Сибири, Севера и Арктики. Красноярск: СФУ; 2018: 178.
- [19] **Махутов Н.А., Гаденин М.М., Москвичев В.В., Ларионов В.В., Матвиенко Ю.Г., Нестеренко Г.И., Новоженова О.Г., Разумовский И.А., Резников Д.О., Романов А.Н., Салин А.Н., Чернышев С.А.** Локальные критерии прочности, ресурса и живучести авиационных конструкций. Новосибирск: Наука; 2017: 600.
-

MATHEMATICAL MODELLING

DOI:10.25743/ICT.2023.28.4.006

**Directions and results of research in the framework of the publishing project
“Strength. Destruction mechanics. Resource. Safety of technical systems”**

V. V. MOSKVICHEV^{1,*}, N. A. CHERNYAKOVA¹, E. V. ANISKOVICH¹, A. E. BUROV¹,
S. V. DORONIN¹, A. M. LEPIKHIN¹, E. V. MOSKVICHEV¹, E. M. REIZMUNT¹,
E. N. FEDOROVA^{1,2}, YU. F. FILIPPOVA¹, A. P. CHERNYAEV³

¹Federal Research Center for Information and Computational Technologies, 660049, Krasnoyarsk, Russia

²Siberian Federal University, Krasnoyarsk, 660041, Russia

³LLC Research Center “SibERA”, Krasnoyarsk, 660062, Russia

*Corresponding author: Vladimir V. Moskvichev, e-mail: krasn@ict.nsc.ru

Received May 18, 2023, revised June 09, 2023, accepted June 23, 2023.

Abstract

The article presents the directions of the main research carried out by a team of authors in the period since 1985. The results of the research were reflected in the framework of the publishing project of scientific, scientific, technical and applied developments “Structural strength. Resource. Destruction mechanics. Safety of technical systems”. Ten collective monographs have been published within the framework of the project. The review form reflects the results for studies of limit states, crack resistance characteristics of structural materials, composite structures of spacecraft, developments in the field of creating machines and structures for the conditions of Siberia and the Arctic. Examples of the results of diagnostics of the technical condition and analysis of the causes of accidents of complex technical systems are given. The priority role of mathematical modelling in solving the indicated problems, especially in terms of the analysis of stress-strain states, is anticipated.

Keywords: resource, fracture mechanics, safety of technical systems.

Citation: Moskvichev V.V., Chernyakova N.A., Aniskovich E.V., Burov A.E., Doronin S.V., Lepikhin A.M., Moskvichev E.V., Reizmunt E.M., Fedorova E.N., Filippova Yu.F., Chernyaev A.P. Directions and results of research in the framework of the publishing project “Strength. Destruction mechanics. Resource. Safety of technical systems”. Computational Technologies. 2023; 28(4):57–72. DOI:10.25743/ICT.2023.28.4.006. (In Russ.)

Acknowledgements. The research was carried out within the state assignment of Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation for Federal Research Center for Information and Computational Technologies.

References

1. **Moskvichev V.V., Burov A.E., Doronin S.V., Lepikhin A.M.** Problemy konstruktsionnoy prochnosti i bezopasnosti tekhnicheskikh system [Problems of structural strength and safety of technical systems]. Krasnoyarsk: ICM SB RAS; 2006: 100. (In Russ.)
2. **Moskvichev V.V.** Development of methods to assess the strength and safety of technical systems. Computational Technologies. 2003; 8(Special issue):5–13. (In Russ.)

3. **Moskvichev V.V., Chernyakova N.A.** Problems and perspective technologies of the machinery complex in the format of regional development. *Journal of the Siberian Federal University. Engineering and Technologies*. 2019; 12(8):890–902. (In Russ.)
4. **Shokin Yu.I., Burov A.E., Doronin S.V., Krushenko G.G., Lepikhin A.M., Moskvichev V.V., Chernyaev A.P.** Model calculations on strength and fracture for structures of technical systems. *Computational Technologies*. 2004; 9(Special issue):101–110. (In Russ.)
5. **Lepikhin A.M., Moskvichev V.V., Doronin S.V.** Reliability, survivability and safety for complex technical systems. *Computational Technologies*. 2009; 14(6):58–70. (In Russ.)
6. **Moskvichev V.V., Lepikhin A.M., Burov A.E., Doronin S.V., Moskvichev E.V.** Calculation and experimental assessment of the strength and limit states of composite structures of spacecraft. *Spacecraft & Technologies*. 2019; 3(29):140–148. (In Russ.)
7. **Moskvichev V.V., Makhutov N.A., Chernyaev A.P., Bukaemskiy A.A., Burov A.Ye., Zyryanov I.A., Kozlov A.G., Koksharov I.I., Krushenko G.G., Lepikhin A.M., Mishin A.S., Moskvicheva L.F., Fedorova E.N., Tsyplyuk A.N.** Treshchinostoykost' i mekhanicheskie svoystva konstruksionnykh materialov tekhnicheskikh sistem. [Crack resistance and mechanical properties of structural materials of technical systems]. Novosibirsk: Nauka; 2002: 334. (In Russ.)
8. **Moskvichev V.V.** Osnovy konstruksionnoy prochnosti tekhnicheskikh sistem i inzhenernykh sooruzheniy. Ch. 1: Postanovka zadach i analiz predel'nykh sostoyaniy [Fundamentals of structural strength of technical systems and engineering structures. Pt 1: Problem statement analysis of limit states]. Novosibirsk: Nauka; 2002: 106. (In Russ.)
9. **Burov A.E., Koksharov I.I., Moskvichev V.V.** Modelirovaniye razrusheniya i treshchinostoykost' voloknistykh metallokompozitov [Modeling the failure and crack resistance of fibrous metal composites]. Novosibirsk: Nauka; 2003: 173. (In Russ.)
10. **Lepikhin A.M., Makhutov N.A., Moskvichev V.V., Chernyaev A.P.** Veroyatnostnyy risk-analiz konstruksiy tekhnicheskikh sistem [Probabilistic risk analysis for design systems]. Novosibirsk: Nauka; 2003: 174. (In Russ.)
11. **Doronin S.V., Lepikhin A.M., Moskvichev V.V., Shokin Yu.I.** Modelirovaniye prochnosti i razrusheniya nesushchikh konstruksiy tekhnicheskikh sistem [Simulation of strength and destruction of supporting structures of technical systems]. Novosibirsk: Nauka; 2005: 250. (In Russ.)
12. **Stepnov M.N.** Veroyatnostnyye metody otsenki kharakteristik mekhanicheskikh svoystv materialov i nesushchey sposobnosti elementov konstruksiy [Probabilistic methods for assessing the characteristics of the mechanical properties of materials and the bearing capacity of structural elements]. Novosibirsk: Nauka; 2005: 342. (In Russ.)
13. **Makhutov N.A.** Konstruksionnaya prochnost', resurs i tekhnogennaya bezopasnost': V 2 ch. Ch. 1: Kriterii prochnosti i resursa [Structural strength, resource and technogenic safety: In 2 parts. Pt 1: Strength and resource criteria]. Novosibirsk: Nauka; 2005: 494. (In Russ.)
14. **Makhutov N.A.** Konstruksionnaya prochnost', resurs i tekhnogennaya bezopasnost': V 2 ch. Ch. 2: Obosnovaniye resursa i bezopasnosti [Structural strength, resource and technogenic safety: In 2 parts. Pt 2: Resource and security rationale]. Novosibirsk: Nauka; 2005: 610. (In Russ.)
15. **Moskvichev V.V., Krushenko G.G., Burov A.E., Uskov I.V., Fedorova E.N.** Nanoporoshkovyye tekhnologii v mashinostroyenii [Nanopowder technologies in mechanical engineering]. Krasnoyarsk: Sibirskiy Federalnyy Universitet; 2013: 185. (In Russ.)
16. **Moskvichev V.V., Testoedov N.A., Vasil'ev V.V., Khalimonovich V.I., Lepikhin A.M., Aniskovich E.V., Burov A.E., Golovenkin E.N., Doronin S.V., Eremin N.V., Levko V.A., Moskvichev E.V., Pokhabov Yu.P., Razin A.F., Sin'kovskiy F.K., Filippova Yu.F., Chernyaev A.P., Chernyakova N.A.** Nesushchaya sposobnost' i bezopasnost' metallokompozitnykh bakov kosmicheskikh apparatov [Bearing capacity and safety of metal-composite spacecraft tanks]. Novosibirsk: Nauka; 2021: 440. (In Russ.)
17. **Moskvichev V.V., Makhutov N.A., Shokin Yu.I., Lepikhin A.M., Aniskovich E.V., Burov A.E., Gadenin M.M., Gotovko S.A., Doronin S.V., Kashubskiy N.I., Moskvichev E.V., Moskvicheva L.F., Reyzmunt E.M., Sukhodoeva N.V., Fedorova E.N., Filippova Yu.F., Chaban E.A., Chernyaev A.P., Chernyakova N.A.** Prikladnye zadachi konstruksionnoy prochnosti i mekhaniki razrusheniya tekhnicheskikh sistem [Applied problems of structural strength and fracture mechanics of technical systems]. Novosibirsk: Nauka; 2021: 796. (In Russ.)

18. **Fortov V.E., Makhutov N.A., Moskvichev V.V., Fomin V.M.** Mashinostroenie Rossii: tekhnika Sibiri, Severa i Arktiki. [Mechanical Engineering in Russia: technology of Siberia, the North and the Arctic]. Krasnoyarsk: Sibirskiy Federalnyy Universitet; 2018: 178. (In Russ.)
19. **Makhutov N.A., Gadenin M.M., Moskvichev V.V., Larionov V.V., Matvienko Yu.G., Nesterenko G.I., Novozhenova O.G., Razumovskiy I.A., Reznikov D.O., Romanov A.N., Salin A.N., Chernyshev S.A.** Lokalnye kriterii prochnosti, resursa i zhivuchesti aviatsionnykh konstruktsiy [Local criteria of strength, resource and survivability of aircraft structures]. Novosibirsk: Nauka; 2017: 600. (In Russ.)