

15419344

- ПРОЧНОСТЬ
- МЕХАНИКА РАЗРУШЕНИЯ
- РЕСУРС
- БЕЗОПАСНОСТЬ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

ПРИКЛАДНЫЕ ЗАДАЧИ  
КОНСТРУКЦИОННОЙ  
ПРОЧНОСТИ  
И МЕХАНИКИ РАЗРУШЕНИЯ  
ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ



- ПРОЧНОСТЬ
  - МЕХАНИКА РАЗРУШЕНИЯ
  - РЕСУРС
  - БЕЗОПАСНОСТЬ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ
- 
- 

Издательский проект по выпуску учебной,  
научно-производственной и научной литературы

---

---

Международный институт  
безопасности сложных  
технических систем

Комиссия РАН  
по техногенной безопасности

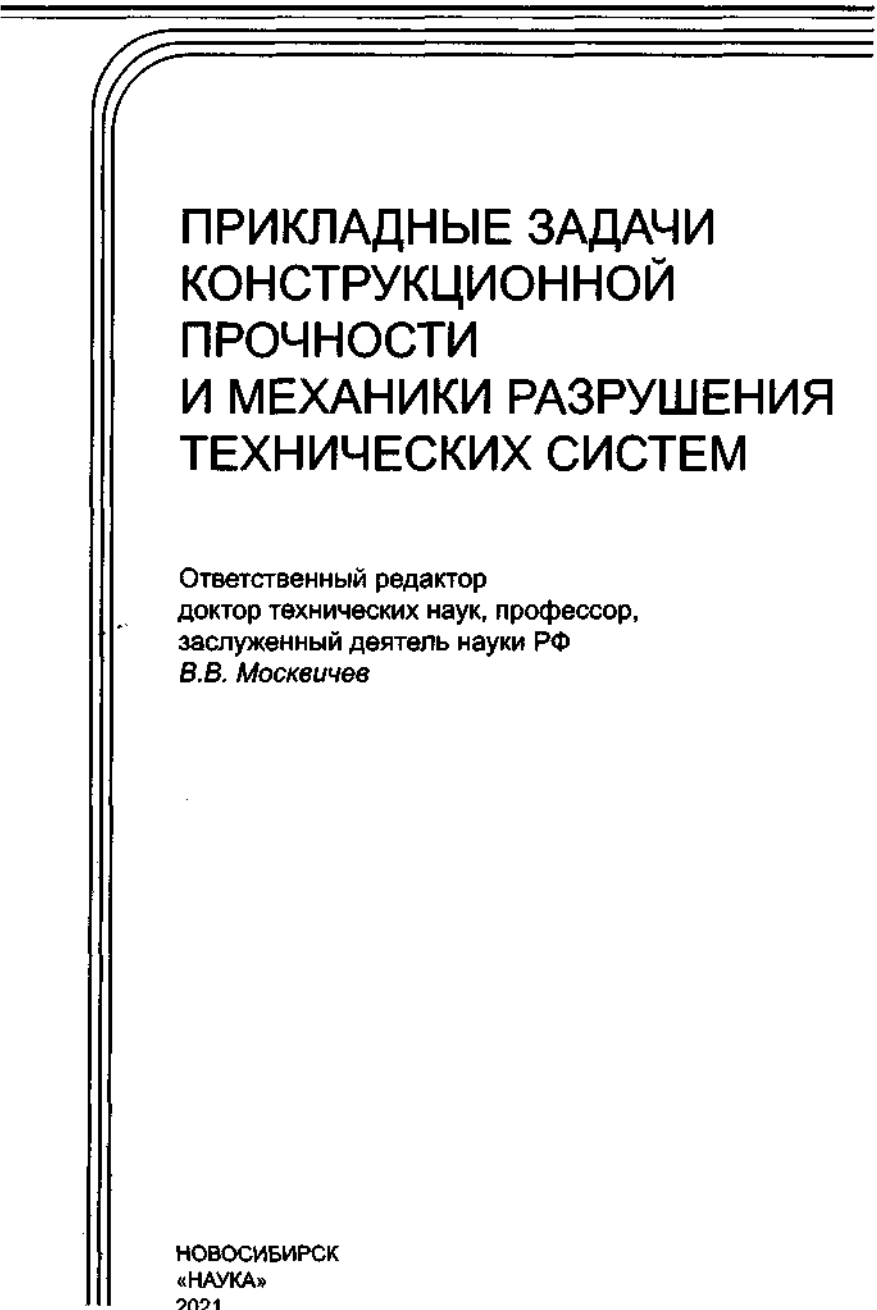
Федеральный  
исследовательский центр  
информационных  
и вычислительных технологий  
Красноярский филиал

Научно-производственное  
предприятие «СибЭРА»

Под общей редакцией  
члена-корреспондента РАН  
**Н.А. Махутова**

доктора технических наук,  
профессора,  
заслуженного деятеля науки РФ  
**В.В. Москвичева**

академика РАН  
**Ю.И. Шокина**

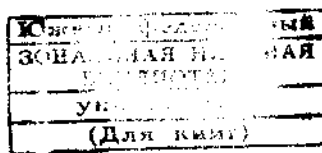


# ПРИКЛАДНЫЕ ЗАДАЧИ КОНСТРУКЦИОННОЙ ПРОЧНОСТИ И МЕХАНИКИ РАЗРУШЕНИЯ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Ответственный редактор  
доктор технических наук, профессор,  
заслуженный деятель науки РФ  
*В.В. Москвичев*

НОВОСИБИРСК  
«НАУКА»  
2021

УДК 539.3:624.04  
ББК 34.2  
П75



1511344



Издание осуществлено при финансовой поддержке  
Российского фонда фундаментальных исследований  
по проекту № 20-18-00029, не подлежит продаже

#### Авторы

В.В. Москвичев, Н.А. Махутов, Ю.И. Шокин, А.М. Лепихин, Е.В. Анискович, А.Е. Буров,  
М.М. Гаденин, С.А. Готовко, С.В. Дорожкин, Н.И. Кашубский, Е.В. Москвичев, Л.Ф. Москвичева,  
Е.М. Рейзмант, Н.В. Суходоева, Е.Н. Федорова, Ю.Ф. Филиппова, Е.А. Чабан, А.П. Чернышев,  
Н.А. Чернякова

**Прикладные задачи конструкционной прочности и механики разрушения технических систем / В.В. Москвичев, Н.А. Махутов, Ю.И. Шокин, А.М. Лепихин и др. — Новосибирск: Наука, 2021. — 796 с.**

ISBN 978-5-02-038832-1.

В монографии рассмотрены общие постановки задач прочности, ресурса, надежности и безопасности технических систем. Представлены результаты исследований причинно-следственного комплекса отказов аварий, дефектности, предельных состояний и коэффициентов запаса элементов конструкций, критериев механики деформирования и разрушения, теории надежности и риск-анализа. Отражен многолетний опыт решения прикладных задач и научно-технических проблем проектирования, расчетов и эксплуатации технических систем различного назначения: сварные конструкции, сосуды и трубопроводы, работающие под давлением, резервуары для хранения нефтепродуктов, подъемно-транспортные машины, экскавационная и горнотранспортная техника, элементы конструкций авиационной и космической техники, гидротехнические сооружения, техника северного исполнения для регионов Сибири и Арктики.

Книга предназначена для широкого круга специалистов, занимающихся проблемами проектирования, эксплуатации и расчетов металлоконструкций технических систем, научных работников и аспирантов, специализирующихся в области конструкционной прочности, механики разрушения и безопасности технических систем уникальных машин, конструкций и сооружений.

Табл. 117. Ил. 446. Библиогр.: 1325 назв.

#### Рецензенты

доктор технических наук, профессор *А.В. Лопатин*  
доктор технических наук, профессор *В.Н. Пермяков*  
доктор технических наук, профессор *В.А. Кулагин*

Утверждено к печати Ученым советом  
Федерального исследовательского центра  
информационных и вычислительных технологий

ISBN 978-5-02-038832-1  
doi: 10.7868/978-5-02-038832-1

© В.В. Москвичев, Н.А. Махутов, Ю.И. Шокин,  
А.М. Лепихин и др., 2021  
© Российская академия наук, 2021  
© Редакционно-издательское оформление. Но-  
восибирский филиал ФГУП «Издательство  
«Наука», 2021

# ОГЛАВЛЕНИЕ

<b>ПРЕДИСЛОВИЕ РЕДАКТОРА</b> . . . . .	5
<b>СПИСОК ОСНОВНЫХ СОКРАЩЕНИЙ</b> . . . . .	9
<b>ВВЕДЕНИЕ</b> . . . . .	11
1. Базовые положения обеспечения прочности и безопасности технических систем . . . . .	11
2. Развитие исследований конструкционной прочности, ресурса и безопасности технических систем . . . . .	21
<b>ГЛАВА 1</b>	
<b>ПОСТАНОВКА ЗАДАЧ ПРОЧНОСТИ, РЕСУРСА И БЕЗОПАСНОСТИ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ</b> . . . . .	30
1.1. Задачи конструкционной прочности, ресурса и безопасности в цикле проектирование — производство — эксплуатация . . . . .	30
1.2. Причинно-следственный комплекс отказов и аварий технических систем . . . . .	35
1.2.1. Анализ эксплуатационной надежности и аварийности технических систем . . . . .	35
1.2.2. Инженерные сооружения и строительные конструкции . . . . .	38
1.2.3. Metallургическое оборудование . . . . .	43
1.2.4. Подъемно-транспортные машины . . . . .	44
1.2.5. Горнодобывающая и горнотранспортная техника . . . . .	46
1.2.6. Оборудование тепловой энергетики . . . . .	51
1.2.7. Резервуары для хранения нефтепродуктов . . . . .	56
1.2.8. Тонкостенные сварные сосуды высокого давления . . . . .	58
1.2.9. Общие закономерности причинно-следственного комплекса отказов и аварий . . . . .	59
1.3. Технологическая и эксплуатационная дефектность конструкций . . . . .	64
1.3.1. Основные виды дефектности . . . . .	64
1.3.2. Технологическая дефектность сварных конструкций . . . . .	66
1.3.3. Технологическая дефектность крупногабаритных кованных деталей . . . . .	74
1.3.4. Эксплуатационные повреждения несущих конструкций . . . . .	77
1.4. Задачи конструкционного материаловедения и безопасность технических систем . . . . .	86
<b>ГЛАВА 2</b>	
<b>НАУЧНЫЕ ОСНОВЫ КОНСТРУКЦИОННОЙ ПРОЧНОСТИ, МЕХАНИКИ РАЗРУШЕНИЯ И БЕЗОПАСНОСТИ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ</b> . . . . .	91
2.1. Предельные состояния и коэффициенты запаса в рамках расчетно-экспериментального комплекса технических систем . . . . .	91

2.1.1. Критерии предельных состояний при обеспечении надежности технических систем . . . . .	91
2.1.2. Критерии предельных напряженно-деформированных состояний материалов . . . . .	94
2.1.3. Предельные состояния элементов конструкций . . . . .	101
2.1.4. Основные и дополнительные типы предельных состояний . . . . .	105
2.1.5. Система коэффициентов запаса для основных типов предельных состояний . . . . .	110
2.1.6. Предельные состояния и коэффициенты запаса при штатных и аварийных ситуациях . . . . .	119
2.1.7. Комплексный анализ несущей способности конструкций . . . . .	122
2.2. Критерии и уравнения предельных состояний в механике разрушения . . . . .	129
2.2.1. Базовые критерии механики разрушения . . . . .	129
2.2.2. Уравнения механики усталостного разрушения . . . . .	141
2.2.3. Методы оценки остаточного ресурса по критериям механики разрушения . . . . .	148
2.3. Основные положения расчетов на трещиностойкость . . . . .	154
2.3.1. Блок-схема расчетов на трещиностойкость и базовые расчетные схемы . . . . .	154
2.3.2. Моделирование и схематизация технологической и эксплуатационной дефектности . . . . .	162
2.3.3. Взаимосвязь коэффициентов запаса по напряжениям и критериям механики разрушения . . . . .	164
2.3.4. Вероятностно-статистическая оценка коэффициентов запаса . . . . .	169
2.3.5. Динамика коэффициентов запаса в связи с кинетикой усталостных трещин . . . . .	173
2.4. Расчетные оценки надежности и риск-анализ конструкций по критериям механики разрушения . . . . .	178
2.4.1. Краткий обзор исследований по теории надежности и безопасности технических систем . . . . .	178
2.4.2. Нормативно-методическое обеспечение анализа надежности и безопасности технических систем . . . . .	179
2.4.3. Основные понятия и определения . . . . .	180
2.4.4. Модели надежности конструкций . . . . .	181
2.4.5. Решение задачи надежности конструкций с дефектами . . . . .	183
2.4.6. Практические задачи оценки надежности конструкций . . . . .	185
2.4.7. Особенности проблемы анализа риска технических систем . . . . .	189
2.4.8. Базовые определения и модели риска . . . . .	192
2.4.9. Особенности оценки конструкционного риска . . . . .	197
2.4.10. Риск-анализ опасности дефектов . . . . .	203
2.5. Математическое моделирование в задачах конструкционной прочности и безопасности . . . . .	208
2.5.1. Этапность задач и модельных расчетов . . . . .	208
2.5.2. Основные группы расчетных моделей . . . . .	211

### **ГЛАВА 3**

<b>РАЗВИТИЕ РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ МЕТОДОВ МЕХАНИКИ РАЗРУШЕНИЯ . . . . .</b>	<b>214</b>
3.1. Расчеты на трещиностойкость плоских элементов конструкций . . . . .	214
3.1.1. Обоснование метода <i>J</i> -проектной кривой . . . . .	214
3.1.2. Учет концентрации напряжений . . . . .	221

3.2. Расчеты на трещиностойкость при наличии коротких трещин . . . . .	230
3.3. Циклическая трещиностойкость в зонах концентрации напряжений . . . . .	239
3.4. Модель роста усталостных трещин при нестационарном нагружении . . . . .	241
3.5. Трещиностойкость при динамическом распространении трещин . . . . .	249

**ГЛАВА 4****МЕХАНИКА РАЗРУШЕНИЯ СВАРНЫХ КОНСТРУКЦИЙ . . . . . 257**

4.1. Ресурсное проектирование сварных конструкций . . . . .	257
4.1.1. Методология и результаты ресурсного проектирования . . . . .	257
4.1.2. Оценки ресурса и надежности типовых сварных соединений . . . . .	268
4.2. Нормирование долговечности и дефектности сварных конструкций . . . . .	272
4.2.1. Общие принципы нормирования долговечности и дефектности . . . . .	272
4.2.2. Анализ надежности норм технологических дефектов сварки . . . . .	277
4.3. Оценка и учет структурно-механической неоднородности в расчетах на трещиностойкость сварных соединений . . . . .	280
4.3.1. Методы численного расчета сварных соединений по критериям механики разрушения . . . . .	280
4.3.2. Экспериментальные исследования характеристик механических свойств и трещиностойкости сварных соединений . . . . .	282
4.3.3. Численное моделирование структурно-механической неоднородности . . . . .	287
4.3.4. Модельные расчеты на трещиностойкость элементов сварных конструкций . . . . .	290
4.4. Трещиностойкость сварных соединений в условиях слоистого растрескивания . . . . .	294
4.4.1. Причины и механизмы слоистого растрескивания . . . . .	294
4.4.2. Методы испытаний сталей на слоистое растрескивание . . . . .	298
4.4.3. Испытания и расчеты на трещиностойкость при слоистом растрескивании . . . . .	304

**ГЛАВА 5****ПРИКЛАДНЫЕ ЗАДАЧИ ПРОЧНОСТИ И РЕСУРСА СОСУДОВ И ТРУБОПРОВОДОВ, РАБОТАЮЩИХ ПОД ДАВЛЕНИЕМ . . . . . 309**

5.1. Общие постановки расчетов оболочечных конструкций . . . . .	309
5.2. Оценка НДС и прочности оболочек воздушного ресивера и автоклава в нештатных ситуациях . . . . .	312
5.3. Несущая способность цилиндрических оболочек корпуса выпарного аппарата . . . . .	318
5.4. Экспертиза и расчетно-экспериментальный анализ причин разрушения гнба паропровода . . . . .	323
5.4.1. Характеристика паропровода и условия аварии . . . . .	323
5.4.2. Результаты механических испытаний, фракто- и металлографического анализов . . . . .	326
5.4.3. Напряженно-деформированное состояние, расчеты на прочность и ресурсы паропровода . . . . .	330
5.5. Комплексный анализ коррозионно-механических повреждений элементов технологического оборудования . . . . .	333
5.5.1. Проблема коррозионно-механических разрушений . . . . .	333
5.5.2. Оценка опасности коррозионных дефектов оболочечных конструкций . . . . .	337
5.5.3. Примеры комплексного анализа коррозионно-механических повреждений и разрушений . . . . .	341
5.6. Оценка трещиностойкости тонкостенных сосудов при упругопластическом деформировании . . . . .	349

5.6.1. Расчетные схемы и модели . . . . .	349
5.6.2. Расчет коэффициентов интенсивности напряжений . . . . .	352
5.6.3. Расчет $J$ -интеграла при упругопластическом деформировании. $J$ -проектные кривые и оценка предельных давлений . . . . .	354
<b>ГЛАВА 6</b>	
<b>ПРОЧНОСТЬ И РЕСУРС РЕЗЕРВУАРОВ ДЛЯ ХРАНЕНИЯ НЕФТЕПРОДУКТОВ</b>	<b>358</b>
6.1. Особенности конструкции и предельные состояния . . . . .	358
6.2. Расчеты на прочность и особенности напряженно-деформированных состояний резервуаров . . . . .	360
6.2.1. Нормативные методы оценки прочности . . . . .	360
6.2.2. Оценка напряженно-деформированных состояний в локальных областях вмятин . . . . .	367
6.3. Нормирование и оценки ресурса резервуаров . . . . .	368
6.3.1. Нормативные методики расчета ресурса . . . . .	368
6.3.2. Оценка ресурса резервуаров с дефектами формы . . . . .	370
6.3.3. Оценка остаточного ресурса при коррозионных повреждениях и старении металла . . . . .	373
6.4. Сравнительная оценка несущей способности узлов соединения конической крыши и стенки резервуара . . . . .	381
<b>ГЛАВА 7</b>	
<b>ПРОЧНОСТЬ И РЕСУРС КОНСТРУКЦИЙ ПОДЪЕМНО-ТРАНСПОРТНЫХ МАШИН</b>	<b>389</b>
7.1. Особенности проектирования и расчетов крановых конструкций . . . . .	389
7.2. Расчетные и экспериментальные исследования несущей способности крановых металлоконструкций . . . . .	391
7.3. Испытания на усталость элементов и моделей крановых конструкций . . . . .	395
7.4. Натурные испытания базовых металлоконструкций кранов повышенной грузоподъемности . . . . .	402
7.5. Исследования напряженного состояния элементов крановых конструкций с трещинами . . . . .	410
7.6. Оценка ресурса опорного узла концевой балки мостового крана . . . . .	413
<b>ГЛАВА 8</b>	
<b>ПРОЧНОСТЬ И РЕСУРС ЭКСКАВАЦИОННОЙ, ГОРНОТРАНСПОРТНОЙ И БУРОВОЙ ТЕХНИКИ</b>	<b>417</b>
8.1. Особенности проектирования и расчетов экскаваторов для открытых горных работ . . . . .	417
8.2. Показатели эксплуатационной надежности экскаваторов . . . . .	428
8.3. Напряженно-деформированные состояния металлоконструкций карьерных экскаваторов . . . . .	435
8.4. Экспертиза конструктивных решений и технологии проектирования карьерного экскаватора с неклассическими компоновочными и кинематическими схемами . . . . .	445
8.4.1. Экспертная оценка конструктивных решений . . . . .	445
8.4.2. Экспертная оценка технологии проектирования . . . . .	456
8.5. Прочность и ресурс карьерных автосамосвалов . . . . .	461
8.5.1. Сравнительный анализ НДС рам . . . . .	461
8.5.2. Оценка ресурса и живучести рам автосамосвалов . . . . .	465
8.6. Прочность и ресурс бурового инструмента ударного действия . . . . .	470



8.6.1. Конструктивные решения, нагруженность и особенности расчетов	470
8.6.2. Анализ результатов вычислительного моделирования и физического эксперимента динамических процессов	475
8.6.3. Результаты модельных расчетов и обоснования оптимальных параметров ударных систем	479
8.6.4. Оценка ресурса деталей пневмоударников при ударно-циклическом нагружении	488

## ГЛАВА 9

### ПРОЧНОСТЬ И РЕСУРС ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИЙ АВИАЦИОННОЙ И КОСМИЧЕСКОЙ ТЕХНИКИ

9.1. Критерии и закономерности разрушения теплозащитных покрытий рабочих лопаток газотурбинных двигателей	494
9.1.1. Постановка задач исследований	494
9.1.2. Системы ТЗП и технологии их нанесения	496
9.1.3. Причины и закономерности разрушения защитных оксидных слоев	498
9.1.4. Оценка характеристик адгезии в системах металл — оксид и ТЗП	502
9.1.5. Анализ напряженно-деформированного состояния системы ТЗП	506
9.1.6. Технологии повышения адгезии в системах металл — оксид и ТЗП	509
9.2. Трещиностойкость и ресурс лопастей воздушных винтов самолетов	511
9.3. Трещиностойкость трубчатых элементов космического аппарата из бороалюминиевого композита	520
9.3.1. Применение бороалюминиевых композиционных материалов в космической технике	520
9.3.2. Модели разрушения волокнистых композитов на основе критериев механики разрушения	522
9.3.3. Определение поправочных функций для коэффициентов интенсивности напряжений	527
9.3.4. Трещиностойкость бороалюминиевого композита при статическом и циклическом нагружениях	529
9.3.5. Разрушение композита при наличии расслоений в вершине поперечной трещины	536
9.3.6. Оценка несущей способности трубчатых элементов ферменных конструкций	541
9.4. Расчетно-экспериментальные исследования прочности и надежности металлокомпозитных баков высокого давления для электрореактивных двигателей космических аппаратов	546
9.4.1. Назначение и особенности конструкции	546
9.4.2. Методика экспериментальных исследований	547
9.4.3. Результаты натурных испытаний	548
9.4.4. Анализ результатов акустико-эмиссионного контроля	549
9.4.5. Вычислительные модели анализа напряженно-деформированных состояний МКБВД	555
9.4.6. Результаты модельных расчетов процессов деформирования и разрушения	559
9.4.7. Расчетные оценки ресурса металлокомпозитных баков	564
9.4.8. Расчетная оценка надежности металлокомпозитных баков	565
9.4.9. Расчет на трещиностойкость лейнера МКБВД	570

9.5. Расчетно-экспериментальные исследования механики деформирования конструкции рефлектора космической антенны из полимерных композиционных материалов . . . . .	574
9.5.1. Конструктивные особенности и технические требования . . . . .	574
9.5.2. Конечно-элементная модель рефлектора . . . . .	576
9.5.3. Предварительный анализ концепции рефлектора . . . . .	576
9.5.4. Физико-механические характеристики материалов конструкции рефлектора . . . . .	578
9.5.5. Анализ геометрической стабильности рефлектора . . . . .	580
9.5.6. Анализ статической и динамической прочности рефлектора . . . . .	582
9.6. Расчеты крупногабаритного прецизионного рефлектора зеркальных антенн наземных систем спутниковой связи . . . . .	583
9.6.1. Конструкция и модели рефлектора . . . . .	583
9.6.2. Обоснование конструктивной схемы и результаты анализа на стадии эскизного проектирования . . . . .	584
9.6.3. Задача оптимизации и верификации результатов на стадии рабочего проектирования . . . . .	587
<b>ГЛАВА 10</b>	
<b>ПРОБЛЕМЫ БЕЗОПАСНОСТИ КРУПНЫХ ГЭС</b> . . . . .	592
10.1. Постановка проблемы . . . . .	592
10.2. Диагностика и остаточный ресурс рабочих колес гидротурбин Красноярской ГЭС . . . . .	593
10.2.1. Общая характеристика гидротурбинного оборудования, программа и технологии диагностического контроля . . . . .	593
10.2.2. Эксплуатационная дефектность рабочих колес гидротурбин . . . . .	599
10.2.3. Исследование характеристик механических свойств, структуры металла РК и оценка остаточных напряжений . . . . .	607
10.2.4. Оценка остаточного ресурса рабочих колес гидротурбин . . . . .	608
10.3. Расчетное обоснование причин разрушения резьбовых соединений крепления крышки гидротурбины Саяно-Шушенской ГЭС . . . . .	622
10.4. Формирование нормативной базы безопасности и защищенности ГЭС от тяжелых аварий . . . . .	628
10.5. Обобщенная оценка опасностей и риска аварий ГЭС Ангаро-Енисейского каскада . . . . .	631
<b>ГЛАВА 11</b>	
<b>АНАЛИЗ ПРЕДЕЛЬНЫХ СОСТОЯНИЙ В АВАРИЙНЫХ СИТУАЦИЯХ</b> . . . . .	637
11.1. Постановка задачи . . . . .	637
11.2. Несущая способность подкрановых балок в штатных и аварийных ситуациях . . . . .	642
11.2.1. Пределные состояния и аварийные ситуации . . . . .	642
11.2.2. Напряженно-деформированное состояние подкрановых балок в штатных режимах эксплуатации . . . . .	643
11.2.3. Напряженно-деформированное состояние подкрановых балок в условиях аварийных ситуаций . . . . .	648
11.2.4. Трещиностойкость и оценка остаточного ресурса подкрановых балок . . . . .	654
11.3. Моделирование аварийной ситуации при экспертизе разрушения металлоконструкций устройства для обслуживания здания реактора АЭС . . . . .	663

11.4. Анализ НДС тонкостенных сосудов при авариях аммиачных холодильных установок . . . . .	668
11.5. Анализ живучести конструкции двуногой стойки карьерного экскаватора . . . . .	676
11.6. Оценка предельных состояний элементов ферменных конструкций ракетно-космического стартового комплекса . . . . .	681
11.7. Общие закономерности анализа аварийных ситуаций . . . . .	687

## **ГЛАВА 12**

<b>НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ СОЗДАНИЯ ТЕХНИКИ СЕВЕРНОГО ИСПОЛНЕНИЯ . . . . .</b>	<b>689</b>
12.1. Проблемы развития техносферы регионов Сибири и Арктики . . . . .	689
12.2. Создание техники северного исполнения: история и проблемные постановки . . . . .	691
12.3. Хладостойкость и трещиностойкость — базовые характеристики техники северного исполнения . . . . .	695
12.4. Низкотемпературные исследования характеристик механических свойств и трещиностойкости . . . . .	697
12.5. Приоритеты научных исследований и задачи машиностроительного комплекса . . . . .	710
<b>ЗАКЛЮЧЕНИЕ . . . . .</b>	<b>715</b>
<b>БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК . . . . .</b>	<b>721</b>