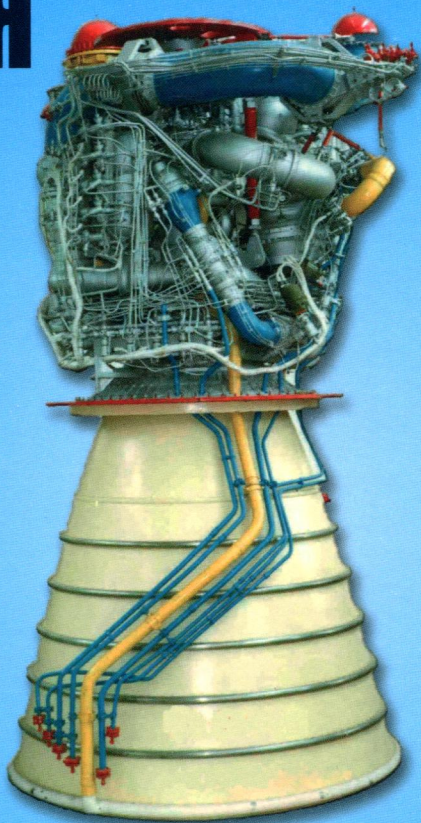


ИССЛЕДОВАНИЯ  
НАПРЯЖЕНИЙ  
И ПРОЧНОСТИ  
РАКЕТНЫХ  
ДВИГАТЕЛЕЙ



# НАПРЯЖЕННО- ДЕФОРМИРОВАННЫЕ СОСТОЯНИЯ ЖРД



НАУКА

# **НАПРЯЖЕННО- ДЕФОРМИРОВАННЫЕ СОСТОЯНИЯ ЖРД**

Под редакцией  
члена-корреспондента РАН  
Н.А. МАХУТОВА,  
доктора технических наук  
В.С. РАЧУКА



МОСКВА НАУКА 2013

УДК 621.4  
ББК 39.65  
Н27



*Издание осуществлено при финансовой поддержке  
Российского фонда фундаментальных исследований  
по проекту № 13-08-07025*

Издание не подлежит продаже

Авторы:

*Н.А. Махутов, В.С. Рачук, М.М. Гаденин, Л.Я. Банах,  
И.Е. Васильев, С.Н. Жеребчиков, А.Д. Кондратьев, С.М. Каплунов,  
С.В. Маслов, Ю.Г. Матвиенко, Ю.К. Михалев, Н.Г. Паничкин,  
В.А. Петушков, И.А. Разумовский, А.Н. Романов, М.А. Рудис,  
А.Н. Салин, Б.Н. Ушаков, А.В. Фомин*

Рецензенты:

доктор технических наук *Е.М. Морозов*,  
доктор технических наук *Г.В. Москвитин*

**Напряженно-деформированные состояния ЖРД** / под ред.  
Н.А. Махутова и В.С. Рачука ; Ин-т машиноведения им. А.А. Бла-  
гонравова РАН. – М. : Наука, 2013. – 646 с. (Исследования напря-  
жений и прочности ракетных двигателей). –

ISBN 978-5-02-038147-6

Рассматриваются расчетно-экспериментальные методы анализа напряженно-дефор-  
мированных состояний узлов и агрегатов жидкостных двигательных энергоустановок ра-  
кетно-космических систем. Приведены результаты исследований, выполненных методами  
экспериментальной механики и расчетно-аналитическими решениями для количественной  
оценки рабочих и предельных состояний несущих элементов и агрегатов жидкостных ра-  
кетных двигателей при основных комбинациях механических и термических напряжений  
в условиях статических, циклических и динамических нагружений.

Для научных сотрудников и специалистов в области прочности и ресурса, конст-  
руирования, расчета и испытаний ракетных двигателей, а также студентов, аспирантов  
и преподавателей вузов.

ISBN 978-5-02-038147-6

© Коллектив авторов, 2013  
© Институт машиноведения  
им. А.А. Благонравова РАН, 2013  
© Редакционно-издательское оформление.  
Издательство “Наука”, 2013

## ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие .....	5
Принятые сокращения .....	11
<b>Раздел I</b>	
<b>ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ ОСНОВЫ РАСЧЕТНОГО АНАЛИЗА НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННЫХ И ПРЕДЕЛЬНЫХ СОСТОЯНИЙ</b>	
<b>Глава 1</b>	
<b>Научные проблемы анализа напряженно-деформированных и предельных состояний .....</b>	<b>14</b>
1.1. Основы определения напряженно-деформированных и пре- дельных состояний при оценках прочности, жесткости и устойчивости .....	14
1.2. Научные основы определения напряженно-деформированных и предельных состояний для оценки ресурса .....	29
1.3. Основные положения оценки надежности по параметрам напряжений и деформаций .....	35
1.4. Научные основы оценки живучести с учетом напряженно- деформированных состояний .....	38
1.5. Постановка проблем предельных состояний, безопасности и риска .....	41
<b>Глава 2</b>	
<b>Комплексный анализ напряженно-деформированных и предельных состояний несущих элементов ЖРД .....</b>	<b>43</b>
2.1. Связь между воздействиями и напряженно-деформированны- ми состояниями .....	43
2.2. Расчетный анализ напряженно-деформированных состояний .....	55
2.3. Определяющие параметры уравнений состояния для анализа напряженно-деформированных состояний .....	69
<b>Глава 3</b>	
<b>Расчетный анализ напряженно-деформированных состояний в зонах концентрации .....</b>	<b>74</b>
3.1. Аналитические решения краевых задач в зонах концентрации	74

3.2. Интерполяционные методы анализа напряженно-деформированных состояний в зонах концентрации .....	75
3.3. Аналитические решения краевых задач для зон трещин .....	85
3.4. Интерполяционные решения упругопластических задач для трещин .....	89

#### **Глава 4**

<b>Численные методы анализа напряженно-деформированных состояний .....</b>	<b>92</b>
4.1. Основы численных методов анализа напряжений .....	92
4.2. Развитие численных методов анализа напряжений и деформаций в элементах ЖРД .....	94
4.3. Основные виды численных решений краевых задач .....	96

#### **Глава 5**

<b>Расчеты напряжений и деформаций в типовых элементах ЖРД .....</b>	<b>118</b>
5.1. Типовые аналитические решения краевых задач .....	118
5.2. Типовые численные решения краевых задач .....	128

#### **Глава 6**

<b>Обобщенный анализ напряженно-деформированных и предельных состояний ЖРД .....</b>	<b>161</b>
6.1. Учет базовых характеристик ЖРД, материалов и рабочих сред .....	161
6.2. Локальные НДС, прочность и долговечность элементов ЖРД .....	169
6.3. Вибронагруженность и вибропрочность элементов ЖРД .....	176

### **Раздел II**

## **ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ МЕТОДЫ АНАЛИЗА НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННЫХ И ПРЕДЕЛЬНЫХ СОСТОЯНИЙ ЖРД**

---

#### **Глава 7**

<b>Методы экспериментальной механики в проблемах оценки НДС .....</b>	<b>178</b>
7.1. Развитие методов экспериментальной механики .....	178
7.2. Основы поляризационно-оптического метода .....	184
7.3. Проведение исследований методом фотоупругости на замороженных моделях .....	221
7.4. Метод оптически активных покрытий .....	242

#### **Глава 8**

<b>Метод хрупких тензочувствительных покрытий .....</b>	<b>255</b>
8.1. Основы метода хрупких тензочувствительных покрытий .....	255

8.2. Хрупкие тензочувствительные покрытия ИМАШ .....	266
8.3. Технология получения оксидных тензоиндикаторов .....	272
8.4. Методика проведения испытаний с применением хрупких тензочувствительных покрытий .....	293
8.5. Примеры применения хрупких тензочувствительных покрытий .....	304
8.6. Применение хрупких канифольных покрытий для исследования напряженно-деформированного состояния крыльчаток ТНА высокого давления при разгонных испытаниях .....	308
8.7. Применение оксидных тензоиндикаторов для исследования напряженно-деформированного состояния крыльчатки ТНА высокого давления при гидротests .....	310
8.8. Применение стекломалевых тензопокровтий для исследования напряженно-деформированного состояния лопаток колеса турбины ТНА высокого давления при разгонных испытаниях .....	314
8.9. Применение стекломалевых тензопокровтий для исследования напряженно-деформированного состояния насосного колеса ТНА высокого давления при разгонных испытаниях .....	319
8.10. Применение стекломалевых тензопокровтий для исследования напряженно-деформированного состояния насосных колес ТНА высокого давления при стендовых испытаниях ...	324

## **Глава 9**

<b>Метод измерений полей деформаций по картинам муаровых полос .....</b>	<b>339</b>
9.1. Получение муаровых картин при повышенных и пониженных температурах .....	339
9.2. Особенности процесса обработки изображений муаровых картин .....	350

## **Глава 10**

<b>Методы оптической и голографической интерферометрии и термовидения .....</b>	<b>364</b>
10.1. Метод голографической интерферометрии .....	364
10.2. Использование метода голографии и термовидения для определения состояний крыльчатки .....	370

## **Глава 11**

<b>Метод и системы тензометрических и термометрических исследований .....</b>	<b>374</b>
11.1. Особенности стендовых и термометрических исследований .....	374
11.2. Определение деформаций в исследуемой точке по показаниям тензорезисторов .....	390
11.3. Обработка и анализ результатов измерений .....	398

11.4. Метод тензорезисторного определения накопленных повреждений .....	408
<b>Глава 12</b>	
<b>Некорректные и обратные задачи исследования НДС .....</b>	<b>417</b>
12.1. Постановка решения задач экспериментальной механики ....	417
12.2. Методы решения некорректных и обратных задач .....	420
<b>Раздел III</b>	
<b><u>АНАЛИЗ ДИНАМИЧЕСКОЙ НАГРУЖЕННОСТИ ЖРД</u></b>	
<b>Глава 13</b>	
<b>Методы и системы анализа и измерений динамических состояний ЖРД .....</b>	<b>442</b>
13.1. Основы анализа импульсных динамических и вибрационных состояний .....	442
13.2. Методы и средства определения динамических и вибрационных состояний элементов ЖРД .....	458
<b>Глава 14</b>	
<b>Предельные характеристики вибропрочности и виброресурса элементов ЖРД .....</b>	<b>476</b>
14.1. Характеристики вибропрочности жидкостного ракетного двигателя .....	476
14.2. Расчетно-теоретические методы анализа динамической прочности составных механических систем. Динамические характеристики и НДС конструкции ЖРД .....	488
14.3. Динамические и прочностные характеристики ЖРД .....	498
14.4. Вынужденные колебания двигателя .....	519
14.5. Оценка долговечности элементов конструкции ЖРД на основе модальных характеристик системы .....	524
14.6. Колебания и прочность трубопроводов ЖРД при ударных нагрузках .....	529
<b>Глава 15</b>	
<b>Динамические состояния многоопорных роторов .....</b>	<b>541</b>
15.1. Основные проблемы динамики быстровращающихся роторных систем .....	541
15.2. Динамическая модель системы “многомассовый гибкий ротор–среда–плавающие уплотнительные кольца” .....	546
15.3. Динамические характеристики роторной системы ТНА .....	548
15.4. Уравнение колебаний роторной системы “многомассовый ротор–среда–плавающие уплотнительные кольца” .....	557
15.5. Собственные колебания многодискового ротора .....	559

15.6. Нагрузки на опоры для ротора в щелевых уплотнениях и в плавающих уплотнительных кольцах .....	561
15.7. Динамическое гашение колебаний в многомассовой системе “ротор–среда–плавающие уплотнительные кольца” .....	565
15.8. Виброударные режимы в роторной системе ТНА .....	569
15.9. Колебания ротора при воздействии импульсных нагрузок ...	585
15.10. Оценка прочности пирографитового уплотнительного кольца .....	595

## **Глава 16**

<b>Комплексные методы анализа НДС и работоспособности ЖРД</b> .....	<b>604</b>
16.1. Комплексный анализ напряженно-деформированных и предельных состояний .....	604
16.2. Учет влияния рабочих сред на характеристики прочности и трещиностойкости .....	616
16.3. Учет виброповреждений и виброизноса при оценках ресурса ЖРД .....	618
<b>Литература</b> .....	<b>623</b>