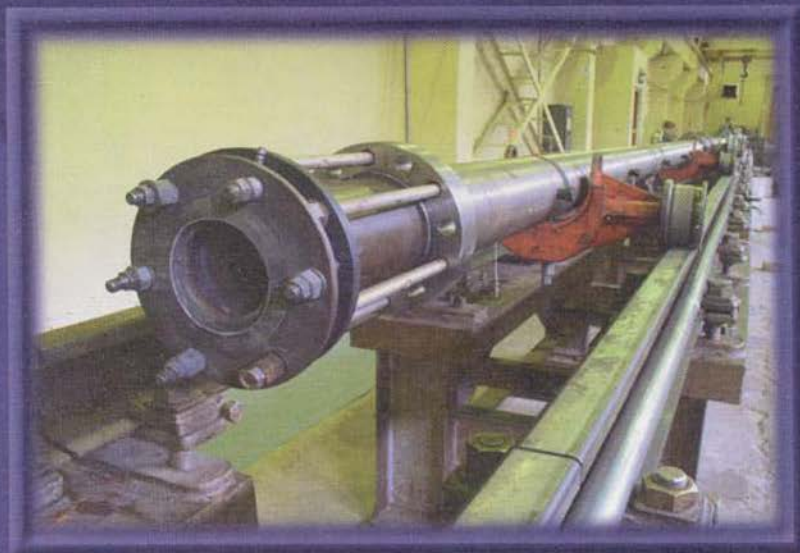


# МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ СВОЙСТВ МАТЕРИАЛОВ ПРИ ИНТЕНСИВНЫХ ДИНАМИЧЕСКИХ НАГРУЗКАХ



ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ УНИТАРНОЕ ПРЕДПРИЯТИЕ  
«РФЯЦ–ВНИИЭФ»

# **МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ СВОЙСТВ МАТЕРИАЛОВ ПРИ ИНТЕНСИВНЫХ ДИНАМИЧЕСКИХ НАГРУЗКАХ**

**Монография**

Под общей редакцией  
доктора физико-математических наук  
М. В. Жерноклетова

2-е издание, дополненное и исправленное

Саров, 2005

ББК 22.23  
М54  
УДК 534.222.2

**Методы исследования свойств материалов при интенсивных динамических нагрузках:** Монография / Под общ. ред. д-ра физ.-мат. наук М. В. Жерноклетова. – 2-е изд., доп. и испр. – Саров: ФГУП «РФЯЦ–ВНИИЭФ», 2005. – 428 с. – ил.

ISBN 5-9515-0043-5

Монография ведущих специалистов Института физики взрыва ФГУП «РФЯЦ–ВНИИЭФ» представляет собой последовательное изложение экспериментальных методов исследования физических, механических и оптических свойств конденсированных сред, подвергнутых ударно-волновому воздействию. Описаны методы изучения детонации конденсированных ВВ, ударного сжатия и адиабатического расширения веществ, распространения и структуры ударных волн. Большое внимание уделено вопросам прочности и разрушения твердых тел динамическими нагрузками. Представлены схемы постановки опытов, методы диагностики и регистрации процессов, происходящих в твердых телах. Приведены конкретные результаты исследования этих процессов.

Кратко изложены основополагающие сведения из механики сплошных деформируемых сред в объеме, необходимом для анализа опытных данных.

Для научных и инженерно-технических работников, занимающихся исследованиями в области физики высоких плотностей энергии, высокоскоростного соударения, действия взрыва на окружающую среду, прочности и разрушения твердых тел, а также для аспирантов и студентов старших курсов, специализирующихся в области теоретической и экспериментальной механики.

Редакторы: д-р физ.-мат. наук М. В. Жерноклетов,  
канд. физ.-мат. наук Б. Л. Глушак

Авторский коллектив: Ю. В. Батьков, В. М. Бельский, В. А. Борисёнок,  
С. И. Герасимов, Б. Л. Глушак, М. В. Жерноклетов, А. Д. Ковтун,  
В. А. Комрачков, А. Л. Михайлов, М. А. Мочалов, Д. В. Назаров,  
В. А. Огородников, О. А. Тюпанова, А. В. Федоров

ISBN 5-9515-0043-5

© ФГУП «РФЯЦ–ВНИИЭФ», 2005

## ПРЕДИСЛОВИЕ КО ВТОРОМУ ИЗДАНИЮ

Положительная оценка, данная заинтересованными читателями и специалистами первому изданию монографии, стимулировала ее повторное издание.

По сравнению с первым во второе издание в главу 6 включен новый раздел «Экспериментальные методы исследования динамической вязкости», расширены разделы «Пьезоэлектрические датчики давления» и «Регистрация процессов инициирования методом импульсной рентгенографии» глав 3 и 8 соответственно. Эти специальные дополнения направлены на более содержательное изложение соответствующих глав монографии.

Во втором издании устранены замеченные неточности технического порядка.

## Содержание

Введение .....	3
Список литературы к введению .....	5
<b>Глава 1</b>	
<b>Основные положения механики сплошных деформируемых сред .....</b>	<b>6</b>
1.1. Напряженно-деформированное состояние твердого тела .....	7
1.2. Уравнение состояния твердого тела .....	9
1.3. Модели пластического деформирования твердых тел .....	12
1.4. Уравнения одномерного движения сжимаемых сред. Основные соотношения на ударном разрыве .....	15
1.5. Взаимодействие волн. Произвольный разрыв .....	19
1.6. Ударные волны и волны расширения в твердых телах .....	25
1.7. Плоские стационарные детонационные волны .....	30
Список литературы к главе 1 .....	34
<b>Глава 2</b>	
<b>Методы и устройства для создания интенсивных ударных нагрузок .....</b>	<b>36</b>
2.1. Метательные устройства пушечного типа .....	36
2.1.1. Пороховые пушки .....	38
2.1.2. Легкогазовые ускорители .....	39
2.1.3. Баллистические ударные трубы .....	43
2.2. Взрывные метательные устройства .....	45
2.3. Электрические и электромагнитные ускорители .....	56
2.4. Комбинированные ускорители .....	58
2.5. Применение источников излучения для генерации ударных волн в твердых телах .....	59
2.6. Устройства для сохранения ударно-сжатых веществ .....	64
2.6.1. Плоское динамическое нагружение .....	65
2.6.2. Цилиндрическая схема нагружения .....	67
2.6.3. Сферическое обжатие ампул сохранения .....	68
Список литературы к главе 2 .....	69
<b>Глава 3</b>	
<b>Регистрация быстропротекающих процессов в динамических исследованиях .....</b>	<b>72</b>
3.1. Дискретные методы измерения волновых и массовых скоростей ..	73
3.1.1. Электроконтактные датчики .....	74
3.1.2. Пьезоэлектрические и сегнетоэлектрические отметчики времени .....	79

3.1.3. Метод вспыхивающих зазоров . . . . .	80
3.1.4. Электрооптическая методика . . . . .	87
3.1.5. Метод замкнутых контактов. . . . .	89
3.2. Методы непрерывной регистрации профилей скорости движения вещества . . . . .	91
3.2.1. Емкостный датчик . . . . .	91
3.2.2. Магнитоэлектрический метод . . . . .	94
3.2.3. Электромагнитный метод . . . . .	96
3.2.4. Индукционный метод . . . . .	99
3.3. Методы непрерывной регистрации профилей давления . . . . .	102
3.3.1. Пьезоэлектрические датчики давления . . . . .	102
3.3.2. Пьезорезистивные датчики давления . . . . .	111
3.3.3. Диэлектрические датчики давления . . . . .	117
3.3.4. Поляризационные датчики давления . . . . .	120
3.4. Теневая фоторегистрация динамических процессов . . . . .	121
3.4.1. Схема теневого фотографирования в расходящемся пучке лучей . . . . .	122
3.4.2. Схема теневого фотографирования в исследованиях нагружения твердых тел . . . . .	125
3.4.3. Схема теневого фотографирования в отраженном свете с помощью фотокамеры . . . . .	126
3.4.4. Схема теневого фотографирования в проходящем свете с помощью электронно-оптического преобразователя . . . . .	128
3.4.5. Точечный кумулятивный источник излучения . . . . .	131
3.4.6. Взрывной термохимический источник света . . . . .	133
3.4.7. Газоразрядный импульсный источник света . . . . .	135
3.5. Метод импульсной рентгенографии . . . . .	136
3.5.1. Постановка рентгенографических экспериментов . . . . .	137
3.5.2. Применение метода импульсной рентгенографии . . . . .	140
Список литературы к главе 3 . . . . .	145

## Глава 4

<b>Определение ударных адиабат и изэнтроп расширения . . . . .</b>	<b>150</b>
4.1. Определение ударных адиабат . . . . .	150
4.1.1. Метод откола . . . . .	150
4.1.2. Метод торможения . . . . .	152
4.1.3. Метод отражения . . . . .	154
4.1.4. Адиабата двукратного сжатия . . . . .	156
4.1.5. Требования, предъявляемые к экспериментам . . . . .	158
4.2. Регистрация изэнтроп расширения веществ из состояния после ударного сжатия . . . . .	163
4.2.1. Метод преград . . . . .	164
4.2.2. Метод изобарического расширения . . . . .	166

4.2.3. Регистрация ударно-индуцированного испарения с использованием лазерной интерферометрии . . . . .	169
4.2.4. Регистрация структуры центрированных волн разрежения . .	170
4.3. Скорость звука в ударно-сжатом веществе . . . . .	172
4.3.1. Метод боковой разгрузки . . . . .	172
4.3.2. Метод догоняющей разгрузки . . . . .	174
4.3.3. Индикаторный метод измерения скорости звука . . . . .	175
4.3.4. Измерение скорости звука внутренними датчиками . . . . .	179
4.4. Классификация ударных адиабат по способам обработки экспериментальных данных . . . . .	180
4.5. Полуэмпирические уравнения состояния . . . . .	185
Список литературы к главе 4 . . . . .	189

## Глава 5

<b>Исследование фазовых превращений</b> . . . . .	192
5.1. Полиморфные превращения в ударных волнах . . . . .	192
5.2. Ударные волны разрежения в средах, претерпевших полиморфный переход . . . . .	198
5.3. Плавление твердых тел на ударных волнах и изэнтропах разгрузки . . . . .	201
5.4. Испарение ударно-сжатых твердых тел при расширении . . . . .	204
5.5. Фазовые превращения второго рода в ударных волнах . . . . .	207
5.6. Электропроводность ударно-сжатых материалов . . . . .	208
Список литературы к главе 5 . . . . .	215

## Глава 6

<b>Исследование динамической прочности материалов</b> . . . . .	218
6.1. Экспериментальные методы исследования сдвиговой прочности . .	218
6.1.1. Сравнение ударной адиабаты и изэнтропы кривой всестороннего сжатия . . . . .	218
6.1.2. Регистрация затухания ударной волны . . . . .	219
6.1.3. Регистрация профиля напряжений . . . . .	220
6.1.4. Метод измерения главных напряжений . . . . .	221
6.1.5. Самосогласованный метод . . . . .	224
6.1.6. Метод Тейлора . . . . .	225
6.1.7. Измерение параметров упругого предвестника . . . . .	227
6.2. Динамический предел текучести материалов в ударных волнах . .	228
6.2.1. Упругий предвестник и динамическая прочность металлов . .	228
6.2.2. Сдвиговая прочность ударно-сжатых металлов . . . . .	235
6.2.3. Сдвиговая прочность ударно-сжатых неметаллов . . . . .	238
6.2.4. Метод Тейлора . . . . .	240
6.3. Экспериментальные методы определения откольной прочности . .	242

6.3.1. Способы получения импульсных растягивающих напряжений . . . . .	243
6.3.2. Регистрация откольного разрушения. Определение параметров разрушающих напряжений . . . . .	246
6.3.3. Металлографическое исследование зоны откольного разрушения . . . . .	249
6.4. Откольная прочность конструкционных материалов . . . . .	251
6.4.1. Откольная прочность металлов . . . . .	252
6.4.2. Откольная прочность полимеров и ВВ . . . . .	256
6.5. Критерии откольного разрушения . . . . .	257
6.5.1. Критерии предельного состояния . . . . .	257
6.5.2. Энергетическая концепция откольного разрушения . . . . .	258
6.5.3. Кинетические модели разрушения . . . . .	259
6.6. Экспериментальные методы исследования динамической вязкости . . . . .	265
6.6.1. Метод свободных затухающих колебаний оболочек . . . . .	266
6.6.2. Оценка вязкости по ширине фронта ударной волны . . . . .	268
6.6.3. Оценка вязкости по скоростным зависимостям сопротивления материалов деформированию при сжатии в ударных волнах и растяжению при отколе . . . . .	270
6.6.4. Метод фиксированных линий . . . . .	271
6.6.5. Оценка вязкости жидкости по измерению скорости движения в ней цилиндрических тел . . . . .	273
6.6.6. Оценка вязкости твердых и жидких материалов по развитию возмущений на ФУВ . . . . .	276
6.6.7. Методы определения вязкости в осе- и центрально-симметричных нестационарных течениях . . . . .	278
Список литературы к главе 6 . . . . .	280

## Глава 7

<b>Определение температуры ударно-сжатых прозрачных материалов . . . . .</b>	<b>288</b>
7.1. Оптическое излучение и его характеристики . . . . .	288
7.1.1. Оптический диапазон . . . . .	288
7.1.2. Основные свойства оптического излучения . . . . .	290
7.2. Тепловое излучение . . . . .	293
7.2.1. Закон Кирхгофа . . . . .	293
7.2.2. Излучение черного тела . . . . .	294
7.2.3. Законы излучения черного тела . . . . .	296
7.2.4. Излучение реальных тел . . . . .	298
7.2.5. Условные температуры . . . . .	298
7.3. Оптические материалы для физических исследований . . . . .	300
7.3.1. Оконные материалы . . . . .	301



7.3.2. Фильтры .....	304
7.4. Основы оптического измерения температуры .....	308
7.4.1. Фотографический метод .....	308
7.4.2. Фотоэлектрический метод .....	311
7.5. Пирометры для регистрации излучения .....	312
7.5.1. Одноканальный пирометр .....	312
7.5.2. Фотоэлектрический пирометр .....	313
7.5.3. Оптико-электронный пирометр .....	314
7.5.4. Эталонные источники излучения .....	315
7.6. Температура ударно-сжатых материалов .....	317
7.6.1. Ионные кристаллы .....	317
7.6.2. Сжиженные инертные газы – аргон, ксенон и криптон .....	322
7.6.3. Жидкий азот .....	322
7.6.4. Галогенпроизводные метана .....	323
7.7. Исследование свойств ударно-сжатых материалов оптическими методами. ....	324
7.7.1. Коэффициент отражения света .....	324
7.7.2. Показатель преломления ударно-сжатых оптически прозрачных материалов .....	328
7.7.3. Коэффициент поглощения света в ударно-сжатых материалах .....	331
Список литературы к главе 7 .....	333

## Глава 8

### Определение параметров детонации и работоспособности продуктов взрыва твердых ВВ .....

8.1. Исследование процесса инициирования детонации .....	336
8.1.1. Методы сравнения .....	337
8.1.2. Оптический метод клин-теста .....	338
8.1.3. Метод торможения границы раздела .....	340
8.2. Формирование детонационного режима .....	340
8.2.1. Влияние амплитуды и профиля инициирующего импульса .....	340
8.2.2. Регистрация процессов инициирования методом импульсной рентгенографии .....	345
8.2.3. Характер развития химической реакции за фронтом ударной волны .....	349
8.3. Экспериментальное определение параметров нормальной детонационной волны .....	352
8.3.1. Измерение скорости детонации .....	353
8.3.2. Метод откола .....	355
8.3.3. Метод замкнутых контактов .....	359

8.3.4. Магнитоэлектрический метод регистрации массовой скорости . . . . .	360
8.3.5. Рентгенографический метод . . . . .	361
8.3.6. Определение параметров Жуге с использованием лазерных измерительных систем . . . . .	365
8.3.7. Метод преград. . . . .	368
8.3.8. Уравнения состояния ПВ . . . . .	370
8.4. Определение критического диаметра детонации . . . . .	374
8.5. Бризантность, работоспособность (фугасность) и метательная способность ВВ . . . . .	378
8.5.1. Бризантное действие взрыва . . . . .	379
8.5.2. Определение общей работы взрыва . . . . .	381
8.5.3. Определение метательного действия ВВ . . . . .	385
Список литературы к главе 8 . . . . .	393

## Глава 9

<b>Лазерные доплеровские измерительные системы и их применение в ударно-волновых исследованиях . . . . .</b>	<b>397</b>
9.1. Теоретическая основа интерферометрических методов измерения скорости . . . . .	398
9.2. Основные интерферометрические системы . . . . .	399
9.2.1. Интерферометр смещения . . . . .	399
9.2.2. Лазерный дифференциальный интерферометр . . . . .	400
9.2.3. Оптически-симметричные интерферометры VISAR и ORVIS . . . . .	401
9.2.4. Лазерный интерферометр Фабри – Перо . . . . .	404
9.2.5. Генератор зондирующего излучения . . . . .	406
9.3. Особенности регистрации скорости контактной границы . . . . .	408
9.4. Многоканальные интерферометрические системы . . . . .	410
9.5. Применение лазерных интерферометрических систем в ударно-волновых исследованиях . . . . .	414
9.6. Оптические и интерферометрические методики измерения скорости . . . . .	417
9.6.1. Метод лазерного измерителя волновой скорости (ЛИВС) . . . . .	417
9.6.2. Радиоэлектрический метод . . . . .	418
Список литературы к главе 9 . . . . .	419

# **МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ СВОЙСТВ МАТЕРИАЛОВ ПРИ ИНТЕНСИВНЫХ НАГРУЗКАХ**

Монография

Под общей редакцией д-ра физ.-мат. наук *М. В. Жерноклетова*

Издание 2-е, испр., доп.

Редактор *Л. В. Мазан*

Компьютерная подготовка оригинала-макета *А. А. Ивлева*

---

Подписано в печать 31.10.2005 . Формат 70×108/16. Печать офсетная  
Усл. печ. л. 35. Уч. изд. л. 28. Тираж 250 экз. Зак. тип. № 1658-2005  
ПД № 00568 от 22.05.2000

---

Отпечатано в ИПК ФГУП «РФЯЦ–ВНИИЭФ»  
607190, г. Саров Нижегородской обл.