



ВСЕРОССИЙСКИЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ИНСТИТУТ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ ФИЗИКИ

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ  
МЕТОДЫ И СРЕДСТВА  
В ФИЗИКЕ ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ  
СОСТОЯНИЙ ВЕЩЕСТВА**

**Монография**

Под редакцией  
академика Р.И. Илькаева  
д.т.н. А.Л. Михайлова  
д.ф.-м.н. М.В. Жерноклетова

Москва  
2021

УДК 536  
ББК 22.37  
Э41

Э41      **Экспериментальные методы и средства в физике экстремальных состояний вещества: монография** / Под ред. академика Р.И. Ильяева, д.т.н. А.Л. Михайлова, д.ф.-м.н. М.В. Жерноклетова. – М.: РАН, 2021. – 484 с.

В коллективной монографии известных специалистов в области физики взрыва обобщены экспериментальные методы 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 слабых возмущений и структуры ударных волн. Большое внимание уделено вопросам прочности и разрушения твердых тел динамическими нагрузками. Изложены теоретические основы и методические аспекты определения температур и оптических свойств ударно-сжатых материалов. Рассмотрены современные невозмущающие методы диагностики быстропротекающих процессов на основе рентгеновской и протонной радиографии, лазерных измерительных систем, микроволновой интерферометрии и синхротронного излучения. Применимость методов проиллюстрирована конкретными результатами исследований.

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.

ISBN 978-5-907366-29-9

© Академик Р.И. Ильяев,  
д.т.н. А.Л. Михайлов,  
д.ф.-м.н. М.В. Жерноклетов, 2021

# ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение.....	9
<b>Глава 1. Жерноклетов М.В. Методы и устройства для создания интенсивных ударных и безударных нагрузок.....</b>	<b>12</b>
1.1. Метательные устройства ствольного типа.....	12
1.1.1. Пороховые пушки.....	14
1.1.2. Пневматические установки (ПУ).....	15
1.1.3. Двухступенчатые легкогазовые установки (ЛГУ).....	19
1.1.4. Специализированные ствольные установки ИФВ ВНИИЭФ.....	22
1.2. Взрывные метательные устройства.....	24
1.3. Электрические и электромагнитные ускорители.....	35
1.4. Комбинированные ускорители.....	37
1.5. Применение источников излучения для генерации ударных волн в твердых телах.....	38
1.6. Устройства для сохранения ударно-сжатых веществ.....	43
1.6.1. Плоское динамическое нагружение.....	44
1.6.2. Цилиндрическая схема нагружения.....	46
1.6.3. Сферическое обжатие ампул сохранения.....	48
1.7. Установки и устройства для изэнтропического и квазиизэнтропического сжатия веществ.....	48
1.7.1. Z-машина.....	49
1.7.2. Магнитокумулятивный генератор ВНИИЭФ МК-1.....	51
1.7.3. Квазиизэнтропическое сжатие газов в цилиндрических и сферических устройствах.....	54
<b>Глава 2. Батьков Ю.В., Борисенко В.А., Герасимов С.И., Жерноклетов М.В., Комрачков В.А., Музыря А.К. Регистрация быстропротекающих процессов в динамических исследованиях.....</b>	<b>61</b>
2.1. Дискретные методы измерения волновых и массовых скоростей.....	62
2.1.1. Электроконтактные датчики.....	63
2.1.2. Пьезоэлектрические и сегнетоэлектрические отметчики времени.....	68
2.1.3. Метод вспыхивающих зазоров.....	69
2.1.4. Электрооптическая методика.....	76
2.1.5. Лазерный измеритель волновой скорости (ЛИВС).....	78
2.1.6. Метод оптического рычага.....	79
2.1.7. Метод замкнутых контактов.....	83
2.2. Методы непрерывной регистрации профилей скорости движения вещества.....	84
2.2.1. Емкостной датчик.....	85
2.2.2. Магнитоэлектрический метод.....	87
2.2.3. Электромагнитный метод.....	89
2.2.4. Индукционный метод.....	93
2.3. Методы непрерывной регистрации профилей давления.....	96
2.3.1. Пьезоэлектрические датчики давления.....	96
2.3.3.1. Кварцевый датчик.....	97
2.3.3.2. Пьезополимерный датчик.....	99

2.3.2. Пьезорезистивные датчики давления .....	108
2.3.3. Диэлектрические датчики давления .....	114
2.3.4. Поляризационные датчики давления.....	117
<b>Глава 3. Комрачков В.А., Михайлов А.Л., Подурец А.М., Руднев А.В.</b>	
<b>Импульсная радиография .....</b>	<b>123</b>
3.1. Метод импульсной рентгенографии .....	123
3.1.1. Генерация рентгеновского излучения.....	124
3.1.2. Взаимодействие рентгеновского излучения с веществом .....	126
3.1.3. Ослабление интенсивности рентгеновских лучей в веществе.....	128
3.1.4. Источники импульсного рентгеновского излучения.....	130
3.1.5. Регистрация рентгеновского излучения .....	131
3.1.6. Рентгенографический метод во взрывных экспериментах.....	134
3.2. Импульсный рентгеноструктурный анализ .....	139
3.3. Протонография .....	142
3.3.1. Протонография и рентгенография .....	142
3.3.2. Взаимодействие протонов высокой энергии с веществом.....	144
3.3.3. Протонографическая регистрация быстропротекающих процессов.....	149
3.3.4. Эксперименты на протонном радиографическом комплексе (ПРГК).....	153
<b>Глава 4. Жерноклетов М.В. Определение ударных адиабат и изэнтроп расширения .....</b>	<b>161</b>
4.1. Определение ударных адиабат.....	161
4.1.1. Метод откола .....	162
4.1.2. Метод торможения.....	164
4.1.3. Метод отражения .....	165
4.1.4. Адиабата двукратного сжатия .....	168
4.1.5. Требования, предъявляемые к экспериментам .....	169
4.2. Регистрация изэнтроп расширения веществ из состояния после ударного сжатия .....	175
4.2.1. Метод преград .....	175
4.2.2. Метод изобарического расширения .....	178
4.2.3. Регистрация ударно-индуцированного испарения с использованием лазерной интерферометрии .....	181
4.2.4. Регистрация структуры центрированных волн разрежения .....	183
4.3. Скорость звука в ударно-сжатом веществе .....	184
4.3.1. Метод боковой разгрузки.....	185
4.3.2. Метод догоняющей разгрузки .....	186
4.3.3. Индикаторный метод измерения скорости звука.....	187
4.3.4. Измерение скорости звука внутренними датчиками.....	192
4.3.5. Измерение скорости звука с использованием лазерных интерферометрических систем .....	193
4.4. Классификация ударных адиабат по способам обработки экспериментальных данных.....	198
<b>Глава 5. Борисенко В.А., Глушак Б.Л., Мочалов М.А. Исследование фазовых превращений .....</b>	<b>206</b>
5.1. Полиморфные превращения в ударных волнах.....	206

5.2. Ударные волны разрежения в средах, претерпевших полиморфный переход.....	213
5.3. Плавление твердых тел на ударных волнах и изэнтропах разгрузки.....	215
5.4. Испарение ударно-сжатых твердых тел при расширении.....	218
5.5. Фазовые превращения второго рода в ударных волнах.....	221
5.6. Электропроводность ударно-сжатых материалов.....	222
5.7. Электропроводность ударно-сжатых пьезо- и сегнетозлектриков.....	230
<b>Глава 6. Батьков Ю.В., Глушак Б.Л., Огородников В.А., Тюпанова О.А.</b>	
<b>Динамическая прочность материалов.....</b>	<b>239</b>
6.1. Методы исследования сдвиговой прочности.....	239
6.1.1. Сравнение ударной адиабаты и изотермы кривой всестороннего сжатия.....	239
6.1.2. Регистрация затухания ударной волны.....	240
6.1.3. Регистрация профиля напряжений.....	241
6.1.4. Метод измерения главных напряжений.....	242
6.1.5. Самосогласованный метод.....	245
6.1.6. Метод Тейлора.....	247
6.1.7. Измерение параметров упругого предвестника.....	248
6.2. Динамический предел текучести материалов в ударных волнах.....	249
6.2.1. Упругий предвестник и динамическая прочность металлов.....	249
6.3. Методы исследования откольного разрушения.....	254
6.3.1. Способы реализации импульсных растягивающих напряжений.....	255
6.3.2. Регистрация откольного разрушения, определение параметров разрушающих напряжений.....	258
6.3.3. Металлографическое исследование зоны откольного разрушения.....	261
6.3.4. Эволюция поврежденности при действии волн сжатия.....	264
6.4. Откольная прочность конструкционных материалов.....	266
6.5. Методы исследования динамической вязкости.....	273
6.5.1. Метод свободных затухающих колебаний оболочек.....	274
6.5.2. Оценки вязкости по ширине фронта ударной волны.....	275
6.5.3. Оценки вязкости по скоростным зависимостям сопротивления материалов деформированию при сжатии в ударных волнах и растяжении при отколе.....	277
6.5.4. Оценки вязкости металлов с помощью методики фиксированных линий.....	278
6.5.5. Оценки вязкости по измерению скорости движения в жидкости цилиндрических тел.....	280
6.5.6. Оценки вязкости по развитию возмущений на ФУВ.....	283
6.5.7. Определение вязкости в осе- и центрально-симметричных нестационарных течениях.....	284
<b>Глава 7. Жерноклетов М.В., Мочалов М.А. Определение температуры и оптических свойств ударно-сжатых материалов.....</b>	<b>292</b>
7.1. Оптическое излучение и его характеристики.....	292
7.1.1. Оптический диапазон.....	292
7.1.2. Основные свойства оптического излучения.....	294
7.2. Тепловое излучение.....	297
7.2.1. Закон Кирхгофа.....	297

7.2.2. Излучение черного тела .....	299
7.2.3. Законы излучения черного тела .....	301
7.2.4. Излучение реальных тел .....	302
7.2.5. Условные температуры.....	303
7.3. Оптические материалы для физических исследований .....	305
7.3.1. Оконные материалы .....	306
7.3.2. Фильтры.....	309
7.4. Основы оптического измерения температуры.....	312
7.4.1. Фотографический метод .....	313
7.4.2. Фотоэлектрический метод .....	315
7.5. Пирометры для регистрации излучения.....	316
7.5.1. Одноканальный пирометр .....	316
7.5.2. Фотоэлектрический пирометр.....	317
7.5.3. Оптико-электронный пирометр.....	319
7.5.4. Эталонные источники излучения.....	319
7.6. Температура ударно-сжатых материалов .....	322
7.6.1. Металлы.....	322
7.6.2. Ионные кристаллы .....	329
7.6.3. Сжиженные инертные газы — аргон, ксенон и криптон.....	333
7.6.4. Жидкий азот .....	334
7.6.5. Галогенпроизводные метана.....	335
7.6.6. Оксид магния .....	337
7.6.7. Расчетное определение температуры ударно-сжатых веществ по результатам <i>D</i> -измерений .....	339
7.7. Альтернативные методы регистрации температур .....	342
7.7.1. Нейтронная резонансная спектроскопия.....	342
7.7.2. Комбинированные методы.....	345
7.7.2.1. Рамановская спектроскопия и пирометрия .....	345
7.7.2.2. Определение линии плавления по измерениям температуры и коэффициента отражения.....	348
7.8. Исследование оптических свойств ударно-сжатых материалов .....	352
7.8.1. Коэффициент отражения света.....	352
7.8.2. Показатель преломления оптически прозрачных материалов.....	355
7.8.3. Коэффициент поглощения света .....	359

**Глава 8. Бельский В.М., Жерноклетов М.В. Определение параметров детонации и работоспособности продуктов взрыва твердых ВВ..... 364**

8.1. Исследование процесса инициирования детонации .....	364
8.1.1. Методы сравнения .....	365
8.1.2. Оптический метод клин-теста .....	366
8.1.3. Метод торможения границы раздела .....	368
8.2. Экспериментальное определение параметров нормальной детонационной волны .....	368
8.2.1. Измерение скорости детонации.....	369
8.2.2. Метод откола .....	370
8.2.3. Метод замкнутых контактов .....	375
8.2.4. Магнитоэлектрический метод регистрации массовой скорости .....	375
8.2.5. Рентгенографический метод.....	377

8.2.6. Определение параметров Жуге с использованием лазерных измерительных систем .....	381
8.2.7. Метод преград .....	384
8.3. Определение критического диаметра детонации .....	385
8.4. Бризантность, работоспособность (фугасность) и метательная способность ВВ .....	389
8.4.1. Бризантное действие взрыва .....	390
8.4.2. Определение общей работы взрыва .....	392
8.4.3. Определение метательного действия ВВ .....	396
<b>Глава 9. Михайлов А.Л., Фёдоров А.В. Лазерные доплеровские измерительные системы и их применение в ударно-волновых исследованиях .....</b>	<b>407</b>
9.1. Теоретическая основа интерферометрических методов измерения скорости .....	408
9.2. Основные интерферометрические системы .....	409
9.2.1. Интерферометр смещения .....	409
9.2.2. Лазерный дифференциальный интерферометр .....	410
9.2.3. Оптически-симметричные интерферометры VISAR и ORVIS .....	411
9.2.4. Лазерный интерферометр Фабри — Перо .....	414
9.2.5. Генератор зондирующего излучения .....	416
9.3. Особенности регистрации скорости контактной границы .....	417
9.4. Многоканальные интерферометрические системы .....	420
9.4.1. Многоканальный лазерный интерферометрический метод PDV .....	423
9.5. Применение лазерных интерферометрических систем в ударно-волновых исследованиях .....	427
9.5.1. Исследование параметров детонационных волн .....	427
9.5.2. Затухание упругого предвестника .....	429
9.5.3. Откольная прочность материалов .....	430
9.5.4. Хрупкое разрушение металлов на сдвиговых деформациях .....	431
9.5.5. Исследования изменения коэффициента преломления в прозрачных материалах .....	432
9.5.6. Определение размера частиц при их торможении в газе .....	434
9.5.7. Регистрация эффекта многократного сдвига частоты доплеровского сигнала .....	435
9.5.8. Регистрация скорости и удельной массы потока частиц с поверхности металлов .....	436
9.5.9. Определение параметров начала плавления металлов на волне разгрузки .....	438
<b>Глава 10. Богданов Е.Н., Михайлов А.Л. Микроволновая диагностика .....</b>	<b>443</b>
10.1. Принцип работы радиоинтерферометра .....	443
10.2. Примеры исследований микроволновым методом .....	446
10.2.1. Распространение детонации в зарядах взрывчатых веществ .....	446
10.2.2. Ударно-волновая сжимаемость диэлектриков .....	448
10.2.3. Исследование плазмы ударно-сжатого аргона .....	451
<b>Глава 11. Антипов М.В., Михайлов А.Л., Спириин И.А. Исследование газодинамических процессов с использованием синхротронного излучения .....</b>	<b>456</b>
11.1. Сведения о синхротронном излучении .....	456

11.2. Использование синхротронного излучения во взрывных экспериментах.....	457
<b>Глава 12. Герасимов С.И., Трепалов М.А. Теневая фоторегистрация динамических процессов .....</b>	<b>469</b>
12.1. Схема теневого фотографирования в расходящемся пучке лучей .....	469
12.2. Теневой фоновый метод (ТФМ) .....	475
12.2.1. Визуализация ударных волн с помощью теневого фонового метода .....	476
12.2.2. Измерение параметров ударных волн.....	480