

С. Г. АНДРЕЕВ
М. М. БОЙКО
В. В. СЕЛИВАНОВ

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ МЕТОДЫ ФИЗИКИ ВЗРЫВА И УДАРА



С. Г. АНДРЕЕВ
М. М. БОЙКО
В. В. СЕЛИВАНОВ

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ МЕТОДЫ ФИЗИКИ ВЗРЫВА И УДАРА

Под редакцией
заслуженного деятеля науки РФ,
д.т.н., профессора В.В. Селиванова

Допущено Учебно-методическим объединением вузов
по университетскому политехническому образованию
в качестве учебника для студентов высших учебных
заведений, обучающихся по специальности 170100
«Боеприпасы и взрыватели»



МОСКВА
ФИЗМАТЛИТ®
2013

УДК 532.5:53.08

ББК 22.25

А 65

Андреев С.Г., Бойко М.М., Селиванов В.В. **Экспериментальные методы физики взрыва и удара** / Под ред. заслуженного деятеля науки РФ, д.т.н., профессора В.В. Селиванова. — М.: ФИЗМАТЛИТ, 2013. — 752 с. — ISBN 978-5-9221-1496-7.

Изложены основы теории сжимаемости конденсированных сред, устройство и характеристики техники взрывного и ударного нагружения, принципы действия измерительных и регистрирующих устройств для газодинамических экспериментов с конденсированными веществами. Рассмотрены алгоритмы нахождения характеристик веществ и газодинамических процессов в них. Учебник написан на основе материалов лекций по курсу «Экспериментальная газодинамика», читаемого студентам МГТУ им. Н.Э. Баумана.

Для студентов и аспирантов технических университетов и машиностроительных вузов, а также для инженерно-технических работников, занимающихся разработкой и исследованием техники взрыва и удара.

Допущено Учебно-методическим объединением вузов по университетскому политехническому образованию в качестве учебника для студентов высших учебных заведений, обучающихся по специальности 170100 «Боеприпасы и взрыватели».

© ФИЗМАТЛИТ, 2013

© С. Г. Андреев, М. М. Бойко,
В. В. Селиванов, 2013

ISBN 978-5-9221-1496-7

*К 75-летию кафедры СМ-4
МГТУ им. Н.Э. Баумана*

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	9
Основные индексы, сокращения и обозначения	15
Введение	29
Глава 1. Основные теоретические представления о сжимаемости конденсированных сред	36
§ 1. Основные представления об ударно-волновом сжатии.	36
§ 2. Метод диаграмм пространственно-временных координат и параметров состояния движения	44
2.1. Отображение волновых изменений параметров состояний движения сред в плоскостях с координатами: «давление–массовая скорость» и «расстояние–время» (45). 2.2. Особенности диаграмм состояний движения высокоплотных конденсированных сред (49). 2.3. Элементы алгоритма решения задач с использованием метода диаграмм пространственно-временных координат и параметров состояния движения (54).	
§ 3. Примеры использования алгоритма метода пространственно-временных координат и параметров состояния движения	55
3.1. Анализ плоскопараллельного соударения тонкой пластины и толстой мишени (55). 3.2. Анализ взаимодействия встречных волн разрежения у свободной поверхности мишени, нагружаемой тонким ударником (64). 3.3. Модифицирование с помощью экранов, имеющих различную сжимаемость, начальной части импульса давления на плоскости ударно-волнового нагружения толстой мишени (72). 3.4. Анализ движения пленок (фольг), нанесенных на тыльную плоскость мишени (84).	
§ 4. Расчетная оценка размеров зоны плоскосимметричного течения среды при ударно-волновом воздействии и особенности течения за пределами этой зоны	88
Список литературы к главе 1	92
Глава 2. Экспериментальные исследовательские комплексы и системообразующие элементы	93
§ 5. Ударные трубы	96
§ 6. Открытые полигоны	102
§ 7. Взрывные камеры	105

§ 8. Баллистические камеры	114
§ 9. Простейшая система безопасности при проведении взрывных работ с использованием взрывных и баллистических камер.	118
Список литературы к главе 2	123
Глава 3. Устройства взрывного и ударного нагружения для газодинамических экспериментов	124
§ 10. Понятие начального импульса при газодинамических экспериментах	124
§ 11. Характеристики нагружения среды взрывом и ударом	128
11.1. Особенности нагружения конденсированных сред взрывом (128). 11.2. Повышение амплитуды начального импульса при пересжатых режимах детонации, возникающих в маховских и сходящихся детонационных волнах (156). 11.3. Метание ударников продуктами детонации открытых и полукрытых зарядов ВВ (160). 11.4. Оценка метательного действия зарядов ВВ в закрытых ствольных устройствах (168). 11.5. Характеристики нагружения конденсированных сред ударом тел (175).	
§ 12. Схемы и характеристики устройств нагружения сред взрывом и ударом	195
12.1. Устройства для нагружения объектов взрывом (195). 12.2. Устройства для нагружения объектов ударом (227). 12.3. Устройства для сохранения ударно сжатых веществ (261).	
Список литературы к главе 3	265
Глава 4. Измерительная и регистрирующая техника для газодинамических исследований быстропротекающих процессов	267
§ 13. Устройства и приборы электрических методов регистрации и измерения быстропротекающих процессов	268
13.1. Основные универсальные устройства измерительных систем электрических методов измерения (268). 13.2. Дополнительные элементы измерительных систем специализированного назначения (287). 13.3. Наиболее употребительные датчики и измерители-преобразователи систем измерения характеристик газодинамических процессов (301).	
§ 14. Устройства оптических методов регистрации	371
14.1. Методы высокоскоростной фотографической регистрации (371). 14.2. Использование цифровых технологий в электронно-оптических методах регистрации изображений (397). 14.3. Световые затворы (401). 14.4. Устройство и характеристики некоторых общепотребительных приборов высокоскоростной фоторегистрации (407). 14.5. Источники света и устройства освещения (420). 14.6. Датчики и измерители-преобразователи в оптических методах исследования и регистрации процессов и объектов (440). 14.7. Передаточные элементы систем оптических методов регистрации и измерения (476).	
§ 15. Импульсная рентгенографическая техника	488
15.1. Устройства вывода, или регистрирующие устройства (492). 15.2. Источники импульсного рентгеновского излучения (496).	

15.3. Источники питания рентгеноимпульсных трубок (502).	
15.4. Установки многократного рентгенографирования (506).	
15.5. Кратчайшие сведения о рентгеноимпульсных аппаратах (509).	
§ 16. Элементная база систем синхронизации и некоторые функциональные схемы экспериментов с быстропротекающими процессами . . .	512
16.1. Элементная база систем синхронизации (513). 16.2. Примеры функциональных схем экспериментов (систем синхронизации) (529).	
Список литературы к главе 4	539
Глава 5. Экспериментальные методы нахождения и измерения характеристик веществ и газодинамических процессов	541
§ 17. Методы определения скорости фронта ударной волны, параметров состояния и движения сред	542
17.1. Методы нахождения скорости фронта ударной волны (543).	
17.2. Методы нахождения массовой скорости (551). 17.3. Методы нахождения давления (558). 17.4. Методы нахождения удельного объема (561).	
§ 18. Экспериментальные методы построения ударных адиабат и изоэнтроп конденсированных сред	564
18.1. Метод откола (564). 18.2. Метод торможения (569).	
18.3. Определение ударной адиабаты методом отражения (577).	
18.4. Экспериментальное построение изоэнтроп разрежения и ударных адиабат повторного сжатия конденсированных сред (582).	
§ 19. Экспериментальные методы определения скорости звука в ударно сжатом веществе	587
19.1. Метод боковой разгрузки (587). 19.2. Метод догоняющей разгрузки (589). 19.3. Метод воздействия отраженной волны разрежения на внутренний датчик (593).	
§ 20. Экспериментальное определение параметров детонации	596
20.1. Кратчайший анализ характеристик детонационной волны и ее взаимодействия с преградой (597). 20.2. Экспериментальные методы определения параметров детонации (604).	
§ 21. Экспериментальное нахождение динамики разложения конденсированных взрывчатых веществ в ударных волнах	632
21.1. Газодинамический анализ процесса разложения ВВ в ударных волнах (634). 21.2. Алгоритм эксперимента по установлению динамики разложения методом регистрации полей давления или массовой скорости (636). 21.3. Установление динамики разложения взрывчатых веществ методом квазитонких или «гомобарических» слоев (640).	
Список литературы к главе 5	647
Глава 6. Физическое моделирование в экспериментальных исследованиях	649
§ 22. Основные понятия теории подобия и анализа размерностей.	649

22.1. Физическое моделирование и безразмерные комплексы (649).	
22.2. Метод Рэлея составления безразмерных комплексов и сокращения числа переменных в эксперименте (653).	
Список литературы к главе 6	668
Приложение. Элементы статистических методов обработки и анализа результатов экспериментов	669
§ 23. Элементарные понятия и определения теорий вероятностей.	671
23.1. Функция распределения случайной величины (671).	
23.2. Математическое ожидание, дисперсия и среднее квадратичное отклонение случайной величины (673).	
23.3. Нормальный закон распределения случайной величины (674).	
23.4. Квантили. Квантили нормального распределения (677).	
23.5. Доверительный интервал, доверительная вероятность и уровень значимости (681).	
23.6. Примеры применения знания параметров случайной величины (682).	
§ 24. Выборочный метод измерения случайной величины	686
24.1. Выборочные характеристики при прямых измерениях и оценка параметров случайной величины (686).	
24.2. Выборочные средние и выборочные дисперсии при косвенных измерениях (691).	
24.3. Объединение результатов прямых измерений (693).	
24.4. Отсев грубых погрешностей и проверка гипотезы нормальности распределения (694).	
§ 25. Систематические погрешности и классы точности средств измерений	699
25.1. Классы точности средств измерения и неисключенные систематические погрешности (700).	
25.2. Нахождение доверительной границы неисключенной систематической погрешности результата прямого измерения (701).	
§ 26. Порядок обработки результатов наблюдений и формы представления результатов измерений	702
26.1. Порядок обработки результатов наблюдений при прямых измерениях (702).	
26.2. Формы записи результатов измерения (706).	
26.3. Погрешности косвенных измерений (707).	
§ 27. Статистические методы получения заключений на основании результатов измерений.	714
27.1. Сравнение величин, измеряемых в эксперименте, с константами (714).	
27.2. Сравнение двух экспериментально определяемых величин (719).	
27.3. Установление наличия и количественное описание связи между величинами при экспериментальных исследованиях (728).	
27.4. Примеры использования метода наименьших квадратов (745).	
Список литературы к приложению	751

Предисловие

Книга «Экспериментальные методы физики взрыва и удара» написана, в основном, ведущими преподавателями и высококвалифицированными экспериментаторами кафедры «Высокоточные летательные аппараты» МГТУ им. Н.Э.Баумана С.Г.Андреевым и М.М.Бойко. Главное предназначение данного издания — подготовка специалистов в области техники, создание и достижение эффективного функционирования образцов которой сопряжено с необходимостью проведения экспериментальных исследований поведения сред и материалов при интенсивных динамических воздействиях, приводящих к проявлению ими свойства сжимаемости. Такие воздействия характерны, прежде всего, для устройств, комплексов устройств и технологических операций, в которых используется энергия взрыва и удара, а также для устройств, предназначенных для защиты объектов от взрыва и удара. Книга может быть полезной и для широкого круга специалистов, работающих в смежных областях и интересующихся экспериментальными методами исследования быстротекущих газодинамических процессов, прежде всего и главным образом, в конденсированных средах.

Основное содержание книги включает в себя:

- сведения об устройствах нагружения, позволяющих оказывать на исследуемые материалы и детали воздействие с наперед задаваемыми параметрами;
- изложение физических основ функционирования датчиков и измерительно-преобразовательных устройств, а также других элементов измерительных систем;
- примеры методов нахождения газодинамических характеристик процессов и материалов, при реализации которых используются описанные ранее датчики и измерительные системы.

Более чем сорокатиелетний опыт в выполнении экспериментальных и расчетных работ по исследованию взрывных и ударных процессов в МГТУ им. Н.Э.Баумана, а также преподавания студентам дисциплин, связанных с решением исследовательских задач, привел авторов к пониманию необходимости введения в книгу целого ряда важных дополнений:

- сведений о газодинамике конденсированных сред;
- понятийного аппарата теории размерностей и теории физического подобия;
- описаний основных подходов к применению статистических методов обращения с результатами наблюдений и экспериментов.

При этом сведения о газодинамике конденсированных сред предшествуют изложению основного содержания книги. Такая структура подачи материала способствует более полному и адекватному представлению о функционировании устройств генерации ударноволновых

процессов и измерительных систем, а также развитию у экспериментатора способности интерпретировать результаты опытов. Ознакомление читателя с этим дополнительным материалом, на мой взгляд, помогает более целенаправленно подойти к самостоятельному и обстоятельному освоению или закреплению знаний основ теоретического курса газодинамики.

Знание основ анализа размерностей и теории физического подобия, а также умение практически использовать эти знания, являются необходимым теоретическим элементом образования экспериментатора высокой квалификации, владеющего не только знаниями технических (приборных) элементов эксперимента, но и способностью формировать алгоритм и схему эксперимента. Иными словами, высококвалифицированный экспериментатор должен знать не только «как надо измерять», но и «что надо измерять».

Статистические методы обращения с результатами наблюдений и опытов, которыми должен владеть экспериментатор, представлены авторами в форме приложения со «своей» общепотребительной для математической статистики системой обозначений, отличающейся от той, что использована в предыдущих частях книги, имеющих в основном физическое содержание. Дело в том, что обращение к различным разделам физики, геометрии, механики, электротехники привело к достаточно большому количеству обозначений переменных величин и констант. Оно существенно превышает число строчных и прописных символов, вместе взятых, из латинского и греческого алфавитов. Необходимость сохранения в основной части книги единой «физической» системы обозначений с минимальными отличиями используемых обозначений от привычных вынудила авторов прибегнуть к дополнению общепотребительных буквенных символов уточняющими буквенными индексами. При небольшом количестве формул и их простом виде это не привело к ухудшению восприятия информации. Но «перенос» такой единой системы обозначений в часть книги, посвященную математической статистике, привел бы к неоправданному усложнению и затруднению чтения книги.

В целом, содержание книги соответствует программам учебных дисциплин «Физика взрыва» и «Экспериментальная газодинамика» специальности «Средства поражения и боеприпасы» направления подготовки специалистов «Оружие и системы вооружений». Учебник написан на основе материалов курса лекций «Экспериментальная газодинамика», читаемого авторами книги с 1980 г. на кафедре «Высокоточные летательные аппараты» МГТУ им. Н.Э.Баумана, и содержания семинарских занятий по этой дисциплине. Основы этого курса лекций были заложены профессором В.С.Соловьевым, который читал его с 1960 по 1980 годы.

Эволюция содержания дисциплины и требований, предъявляемых к специалистам, обусловленная развитием и усложнением техники и физики взрыва и удара, привела к необходимости дополнения курса

лекций семинарскими занятиями и новыми домашними заданиями. Выполнение этих заданий призвано научить творчески решать задачи, похожие на те, что возникают в практике разработки экспериментов и обработки их результатов. Последнее обстоятельство в значительной мере определило содержание курса лекций, читаемого авторами с 1980 г., и, соответственно, содержание учебника.

Книга состоит из шести глав и приложения, содержание которых раскрывается в 27 параграфах.

Первая глава книги включает четыре параграфа (§ 1–4) и посвящена основным теоретическим представлениям о сжимаемости конденсированных сред, необходимым для ознакомления читателя с методом диаграмм пространственно-временных координат и параметров состояния движения сред. Этот метод используется экспериментаторами как высокоэффективный «инструмент» при разработке экспериментов, анализе и осмыслении их результатов. С целью лучшего усвоения алгоритма решения задач этим методом рассмотрен ряд практических примеров. Получаемые при этом результаты и выводы используются при изложении содержания последующих частей книги.

Во **второй главе книги**, содержащей пять параграфов (§ 5–9), дается краткое описание основных исследовательских комплексов, в условиях которых могут быть проведены газодинамические эксперименты с использованием различных источников энергии. При этом затрагиваются вопросы техники безопасности проведения экспериментов, связанных с взрывом или ударом.

Третья глава книги, состоящая из трех параграфов (§ 10–12), посвящена устройствам генерации взрывных и ударных воздействий на объекты исследования, отклик которых на эти воздействия может быть надежно и без искажений зарегистрирован современными измерительными системами. В качестве характеристики нагружающей способности или действия этих устройств принимается так называемый начальный импульс, т. е. закон изменения давления на поверхности приложения воздействия, который наблюдался бы, если бы объект исследования обладал только свойством сжимаемости. Авторами рассмотрены различные схемы нагружения сред и генерации начальных импульсов взрывом и ударом, а также приведены результаты аналитического решения задач, позволяющие оценить условия, при которых можно получить начальный импульс с требуемыми характеристиками.

В заключительном параграфе этой главы книги приведены схемы конструкций, реализующих возможность создания начальных импульсов за счет энергии взрыва и удара, а также реализованные характеристики этих конструкций.

Значительная часть аналитических решений задач о нагружении объектов взрывом с «низкоамплитудными и длительно действующими импульсами давления» и задач о взрывном метании ударников ограниченной прочности и «химической ударноволновой» стойкости получена

авторами книги и их коллегами — А.В. Аттетковым и Л.Н. Власовой. При этом авторами книги проведена экспериментальная проверка полученных решений и эксплуатационных характеристик конструкций, разработанных на основе этих решений.

Четвертая глава книги включает четыре параграфа (§ 13–16) и содержит сведения о элементах (устройствах) технической базы, используемых экспериментаторами для формирования различных измерительных и регистрирующих систем, применяемых при исследовании быстропротекающих процессов техники и физики взрыва и удара. Рассмотрены элементы технических баз для реализации электрических (§ 13), оптических (§ 14) и импульсных рентгенографических (§ 15) методов измерения и регистрации. В § 16 ранее описанные с позиций объяснения физических основ функционирования устройства генерации ударноволновых воздействий и элементы измерительных систем рассматриваются уже как составные части систем синхронизации кратковременных стадий существования исследуемого процесса и также кратковременного периода, в течении которого измерительная система способна регистрировать исследуемые величины. Наибольшее внимание уделено датчикам различных принципов действия и измерительно-преобразовательным приборам для этих датчиков. При этом были использованы результаты разработок новых или модификации существовавших ранее измерительных систем, достигнутые сотрудниками ведущих отечественных и зарубежных исследовательских центров, а также разработки авторов книги и их коллег — сотрудников кафедры «Высокоточные летательные аппараты» МВТУ (ныне МГТУ) им. Н.Э. Баумана.

Пятая глава книги, включающая пять параграфов (§ 17–21), содержит примеры некоторых методов нахождения и измерения газодинамических характеристик веществ и процессов, которые приведены с целью дать представление о том, как можно прямым или косвенным образом использовать датчики и соответствующие измерительные системы при решении задач экспериментальной газодинамики. Наличие в лаборатории измерительных систем, даже различных принципов действия, является необходимым, но не достаточным условием надлежащего выполнения многих практически и теоретически важных и актуальных исследований. Практически важные задачи, решаемые экспериментаторами, часто требуют еще и использования достаточно сложных алгоритмов преобразования непосредственных результатов функционирования задействованных в эксперименте измерительных систем в новую, требуемую форму информации. В книге рассматриваются алгоритмы разных уровней сложности. К алгоритмам начального уровня отнесены методы определения скорости фронта ударной волны и параметров состояния движения сред (§ 17). Алгоритмы экспериментальных методов построения ударных адиабат, изэнтроп конденсированных сред, определения скорости звука в ударно сжатом веществе (§ 18 и § 19), равно как и некоторые алгоритмы определения параметров

состояния движения за фронтом ударной волны, отнесены к среднему уровню сложности. В качестве алгоритмов высокого уровня сложности приведены методы определения параметров стационарной детонации и динамики разложения веществ в ударных волнах (§ 20 и § 21). В этой части книги приведены как версии методов решения задач, ставшие уже хрестоматийными, так и некоторые методы, предложенные авторами учебника.

Шестая глава книги (§ 22) знакомит читателя с использованием физического моделирования при проведении экспериментальных исследований сложных процессов, в которых интересующая исследователя характеристика процесса (в частности, конечный результат) зависит не от одного уже выявленного фактора, а от нескольких, причем часто еще недостаточно четко установленных. Представление о физическом моделировании формируется на базе основных понятий теории подобия и анализа размерностей. При этом наибольшую ценность для экспериментатора имеет изложение метода Рэлея получения безразмерных комплексов и сокращения числа переменных, описывающих исследуемый процесс или определяющих характеристику этого процесса, а также способа использования безразмерных комплексов при разработке эксперимента в лабораториях, технические возможности которых недостаточны для непосредственного воспроизведения изучаемого, «натурного» объекта или процесса.

Заканчивается книга **приложением**, которое состоит из пяти параграфов (§ 23–27) и содержит изложение основных элементов математической статистики применительно к задачам обработки и анализа результатов экспериментов. При этом наряду с основными теоретическими сведениями авторы излагают сведения о государственных стандартах, требованиям которых должны удовлетворять обработка и представление результатов прямых измерений, и отмечаются особенности обработки результатов косвенных измерений. При рассмотрении статистических методов получения заключений на основании результатов экспериментов излагаются алгоритмы решения задач: по сравнению измеряемых величин с константами; по сравнению двух экспериментально определяемых величин, характеризующих математическими ожиданиями и дисперсиями; установления наличия, а затем количественного описания связи между экспериментально определяемыми величинами. Изложение материала сопровождается рассмотрением примеров из экспериментальных работ в области техники и физики взрыва и удара. Приведены также справочные материалы (в виде таблиц и рисунков) по математической статистике, необходимые для решения задач в рассматриваемых примерах.

Подготовка столь объемной книги была бы невозможна без кропотливой работы, которая десятилетиями проводилась на кафедре в области разработки и использования экспериментальных методов физики быстротекущих процессов. Именно поэтому книга содер-

жит важную информацию, являющуюся обобщением бесценного опыта многих специалистов и ученых, и, по моему глубокому убеждению, будет представлять интерес для очень широкого круга специалистов, изучающих плазму, ударные волны, процессы истечения и переноса, горение и детонацию, баллистику, различные явления в газах, для инженеров, разрабатывающих быстродействующие механические системы, оптико-электронные приборы, радиоэлектронную аппаратуру и различного рода датчики и индикаторы для регистрации параметров процессов взрыва и высокоскоростного удара.

Научный редактор, доктор технических наук, профессор, заслуженный деятель науки РФ, академик
РАРАН

В.В. Селиванов

Основные индексы, сокращения и обозначения

ГЛАВЫ с I по VI

Латинский алфавит

- A — атомная масса химического элемента;
 a — коэффициент ударной адиабаты, связывающей волновую и массовую скорости $D = a + bu$;
 $a_{\text{хп}}$ — ширина химпика;
 $a_{\text{хпп}}$ — глубина преграды, измеряемая от поверхности контакта с детонирующим зарядом, на которую еще распространяется влияние параметров состояния движения реагирующего вещества в химпике;
 B — магнитная индукция;
 B_D — измерительная база для нахождения скорости фронта ударной волны или детонационной волны;
 B_W — измерительная база для нахождения скорости движения тела или его поверхности;
 b — коэффициент ударной адиабаты, связывающей волновую и массовую скорости;
 C — электрическая емкость;
 $C_{\text{ГОУ}}$ — коэффициент формы головной части пенетратора;
 $C_{\text{мас}}$ — масштабная электрическая емкость;
 C_q — отношение массы снаряда к кубу калибра ствола;
 C_l — электрическая емкость на единицу длины кабеля;
 C_V — удельная теплоемкость при постоянном объеме;
 C_x — коэффициент лобового сопротивления;
 c — эйлерова скорость звука (относительно лабораторной системы координат);
 c_d — скорость звука в чувствительном элементе датчика;
 c_i — скорость звука в изоляции датчика;
 c_l — лагранжева скорость звука;
 $+c_l, -c_l$ — обозначения траекторий движения малых возмущений (характеристических линий) в лагранжевых координатах;
 $c_{\text{ман}}$ — скорость звука в манганине;
 $\bar{c}$ — безразмерный коэффициент (в теории подобия);
 D — скорость фронта ударно-волнового сжатия для ударной или детонационной волны;
 $\bar{D}$ — плотность почернения фото- или киноплетки;
 $D_{\text{ср}}$ — средняя скорость фронта ударно-волнового сжатия или фронта ударной или детонационной волны;
 d — диаметр цилиндра, окружности (или сторона прямоугольника);
 $d_{\text{и}}$ — диаметр измерительного электрода емкостного датчика;
 $d_{\text{ни}}$ — диаметр пятна приложения начального импульса
 $d_{\text{ств}}$ — диаметр канала ствола (калибр ствола);

- d_T — диаметр транслятора;
 d_y — диаметр ударника;
 E — энергия или ЭДС источника напряжения или тока;
 $E_{\text{КУ}}$ — кинетическая энергия ударника;
 $E_{\text{УПР}}$ — модуль Юнга;
 E_{Σ} — энергия деформирования;
 E_{μ} — энергия магнитного поля;
 E^* — освещенность;
 $\overline{E}^*$ — относительная освещенность (освещенность в долях освещенности объекта солнцем на широте Москвы в июльский полдень);
 e — удельная энергия (на единицу массы);
 $e_{\text{экс}}$ — эксцентриситет;
 F — сила сжатия тела или сила сопротивления движению тела;
 f — частота сигнала или фокусное расстояние линзы;
 f_0 — верхняя граница частоты сигналов, начиная с которой искажение амплитуд выходных гармоник в элементах электрической цепи становится недопустимым (верхняя граница полосы пропускания);
 $f_{\text{ВВ}}$ — баллистическая сила взрывчатого вещества (ВВ), или сила пороха;
 $f_{\text{Д}}$ — частота собственных колебаний датчика;
 H — высота заряда ВВ или элемента составного заряда;
 $H_{\text{ДТ}}$ — динамическая твердость;
 $H_{\text{СУ}}$ — высота сброса ударника;
 H_{μ} — напряженность магнитного поля;
 h — лагранжева координата;
 $h_{\text{рф}}$ — лагранжева координата, при которой давление на фронте ударной волны имеет значение $p_{\text{ф}}$;
 I — полный импульс давления;
 $I_{\text{Об}}$ — полный импульс давления, воспринимаемый оболочкой;
 I_T — сила тока;
 i — удельный импульс давления;
 J — интенсивность рентгеновского излучения, сила света;
 $K_{\text{УС}}$ — коэффициент усиления;
 $K_{\text{Отр}}$ — коэффициент, учитывающий отражение волны;
 $K_{\text{К}}$ — коэффициент передачи кабеля ($U_{\text{ВЫХ}}/U_{\text{ВХ}}$);
 K_P — коэффициент пьезочувствительности пьезорезистивного датчика;
 $K_{\text{ПЭ}}$ — коэффициент пьезочувствительности пьезоэлектрического датчика;
 K_a, K_b — коэффициенты в зависимостях для ослабления рентгеновского излучения;
 K_t и K_p — коэффициенты пропорциональности в уравнениях, соответственно, $dt = K_t dX$; $p = K_p Y$;
 $K_{\text{ЖЦ}}$ — жесткость упругосжимаемого цилиндрического тела;

K_{ty} и K_{Wy} — коэффициенты (зависящие от отношения масс заряда ВВ и ударника) в формулах для вычисления времени разгона ударника до конечной скорости метания и значения этой скорости;

K_B — коэффициент, учитывающий влияние балластной массы стенки взрывной камеры на допускаемую массу взрываемого заряда;

K_y — статистический коэффициент усиления;

K_{OT} — коэффициент отклонения осциллографа (характеристика обратно пропорциональная чувствительности осциллографа);

k — отношение удельных теплоемкостей газа при постоянных давлении и объеме;

k_π — число первичных размерностей;

L — индуктивность;

L_l — индуктивность, приходящаяся на единицу длины кабеля;

l — длина (стержня трубы, ствола, канала, кабеля); путь, проходимый светом в контролируемой среде;

l_A — расстояние, пройденное фронтом детонационной волны вдоль листа ВВ или детонационного транслятора до некоторой точки А;

l_D — длина проводника чувствительного элемента реостатного датчика;

$l_{кр}$ — глубина кратера;

l_{OH} — протяженность оптической неоднородности;

l_p — рабочая длина дуги фокальной окружности;

l_C — длина головной части проводника — высокоомного чувствительного элемента реостатного датчика до точки электрического замыкания на корпус датчика;

M — число Маха;

$M_{пэ}$ — пьезомодуль пьезоэлектрического материала;

$m_{ВВ}$ — масса заряда ВВ;

m_{OB} — масса оболочки;

m_y — масса ударника;

N — число линий на миллиметр;

N_A — число Авогадро;

$N_{ц}$ — число циклов знакопеременного напряжения;

$\bar{N}_\Phi$ — число полос смещения на фронте ударной волны;

n — показатель изотропии продуктов детонации;

$\bar{n}$ — направление нормали к поверхности;

n_M — число ступеней в схеме умножения напряжения Аркадьева–Маркса;

n_{OP} — число основных размерностей физических величин;

n_C — показатель преломления света;

n_π — количество размерных констант и переменных физических величин, которые определяют значение искомой физической величины;

n_{π^*} — количество безразмерных комплексов, составленных из размерных констант и переменных физических величин, которые определяют значение искомой физической величины;

p — давление;

p_m — амплитудное значение давления начального импульса;

p_r^0 — остаточная поляризация;

$p_{об}$ — давление на фронте ударной волны в веществе исследуемого образца в момент выхода его на поверхность контакта с материалом чувствительного элемента пьезодатчика, работающего в токовом режиме регистрации;

$p_{ост}$ — остановочное значение давления начального импульса;

$p_{отк}$ — давление откола (отрицательное), характеризующее прочность материала при растяжении, возникающее в волнах разрежения;

$p_{пэ}$ — давление в материале пьезоэлемента, возникающее под действием ударной волны в исследуемом веществе, контактирующем с пьезоэлементом;

$p_{ув}$ — давление при ударно-волновом характере сжатия;

$p_{хп}$ — давление взрывчатого вещества в химике на поверхности фронта ударно-волнового сжатия детонационной волны;

$p_{хпп}$ — давление в преграде, отображающее давление $P_{хп}$ во взрывчатом веществе;

$p_{чж}$ — давление продуктов детонации на плоскости Чепмена–Жуге фронта детонационной волны;

$p_{чжп}$ — давление в преграде, отображающее давление $P_{чж}$ в продуктах детонации;

Q — электрический заряд;

Q_V — удельная теплота взрыва при постоянном объеме, определяемая с помощью калориметрической бомбы;

$Q_{чж}$ — удельная теплота детонационного превращения, протекающего в зоне химика (между ударным фронтом и поверхностью Чепмена–Жуге), в первом приближении равная теплоте взрыва при постоянном объеме Q_V ;

q — плотность электрического заряда (на единицу поверхности);

R — радиус поверхности сферического и цилиндрического тел или универсальная газовая постоянная. При обозначении омического сопротивления устройства или детали электрической схемы используется тот же символ R , но дополненный буквенными или числовыми индексами);

$R_{вх}$ — входное сопротивление прибора или устройства;

$R_{вх}^{ос}$ — входное сопротивление осциллографа;

$R_{вых}$ — выходное сопротивление;

R_d — омическое сопротивление чувствительного элемента датчика;

R_z — радиус заряда или фрагмента составного заряда;

$R_{ис}$ — омическое сопротивление исследуемой среды;

$R_{ни}$ — радиус окружности, ограничивающей поверхность, к которой прикладывается начальный импульс;

R_P — радиус фокальной дуги окружности, по которой располагается киноплёнка скоростного фоторегистратора;

R_C — сопротивление согласующего резистора;

- $R_{\text{ТД}}$ — номинальное сопротивление прецизионного резистора;
 R_e — число Рейнольдса;
 R_i — внутреннее сопротивление источника тока;
 R_{Ω} — омическое сопротивление резистора, проводника;
 r — радиальная координата;
 S — энтропия;
 $S_{\text{УВ}}$ — энтропия при ударноволновом сжатии;
 s — площадь поверхности;
 $s_{\text{д}}$ — площадь металлической обкладки на активной грани пьезо-элемента (воспринимающей давление);
 $s_{\text{мид}}$ — площадь миделева сечения тела;
 S_U — чувствительность осциллографа;
 T — температура;
 T_{Π} — период следования импульсов;
 $T_{\text{УВ}}$ — температура ударноволнового сжатия;
 T_S — температура изоэнтропического сжатия;
 t — время;
 $t_{\text{ГИ}}$ — задержка выходного импульса генератора импульсов относительно момента выхода с него синхроимпульса;
 $t_{\text{ЗАД}}$ — время задержки выходного импульса с генератора импульсов или другого устройства задержки относительно входного управляющего импульса;
 $t_{\text{ЗАП}}$ — время запаздывания амплитудного значения тока коммутатора относительно момента входа в него управляющего импульса;
 $t_{\text{И}}$ — длительность импульса свечения источника света или импульса тока источника электрической энергии, стандартная характеристика функционирования генератора импульсов — длительность импульса;
 $t_{\text{ИВП}}$ — задержка появления воспламенительного, детонационного или ударно-волнового инициирующего импульса относительно момента подачи электрического импульса на устройство инициирования (электровоспламенитель, электродетонатор);
 $t_{\text{Н}}$ — время нарастания электрического сигнала до амплитудного значения; время нарастания давления в переднем фронте начального импульса;
 $t_{\text{НАГ}}$ — задержка появления импульса давления на нагружаемый образец относительно начала выделения энергии в устройстве нагружения;
 $t_{\text{ПЕР}}$ — длительность переходного процесса в источнике напряжения или тока, источнике света;
 $t_{\text{ПР}}$ — длительность исследуемого процесса или длительность исследуемой стадии, короткой в сравнении со всем процессом;
 t_p — время спада давления в заднем фронте начального импульса;
 $t_{\text{РЕГ}}$ — время регистрации процесса;
 $t_{\text{С}}$ — стандартная характеристика функционирования генератора импульсов — длительность среза;

t_y — время установления амплитудного значения электрического сигнала ступенчатой формы;

t_Φ — стандартная характеристика функционирования генератора импульсов — длительность фронта;

t_m — время существования постоянного максимального давления p_m начального импульса;

$t_{p_{ув}}$ — время действия постоянного давления ударноволнового происхождения;

t_t — задержка появления исследуемой стадии процесса относительно момента генерации электрического импульса иницирования, подаваемого на вход электровоспламенителя или электродетонатора;

t_+ — длительность действия положительной фазы давления;

U — напряжение;

$U_{вх}$ — напряжение сигнала, подаваемого на вход электронного устройства;

$U_{вых}$ — напряжение сигнала, появляющегося на выходе электронного устройства;

$U_{пит}$ — выходное напряжение стабилизированного источника напряжения;

U_m — стандартная характеристика функционирования генератора импульсов — амплитуда напряжения импульса или, просто, амплитуда напряжения импульсного сигнала;

U_m^* — максимальное напряжение, до которого заряжается конденсатор источника напряжения накопительного типа;

u — массовая скорость;

$u_{п}$ — массовая скорость вещества в преграде;

$u_{хп}$ — массовая скорость взрывчатого вещества в химпике на поверхности фронта ударно-волнового сжатия детонационной волны;

$u_{чж}$ — массовая скорость продуктов детонации на поверхности Чепмена–Жуге фронта детонационной волны;

V_p — скорость разветки;

v — удельный объем;

W — скорость тела или его свободной поверхности;

W_Φ — скорость движения свободной поверхности фольги (индикаторной фольги);

w — степень разложения взрывчатого вещества;

X — координаты точек графического отображения сигнала на плоскости носителя информации (экране осциллографа, киноплёнке);

x — эйлерова координата точки тела;

$x_{пов}$ — расстояние до поворота детонации;

x_D — координата фронта ударной волны, отсчитываемая от головной точки проволочного резистивного чувствительного элемента реостатного датчика;

$\bar{x}$ — безразмерный показатель степени основной размерности массы в размерности физической величины или константы;

Y — координата точек графического отображения сигнала на плоскости носителя информации регистрирующего устройства (экране осциллографа, киноплёнке);

$\bar{y}$ — показатель степени основной размерности длины в размерности физической величины или константы;

Z_0 — волновое сопротивление кабеля;

$Z_{\text{ВВХ}}^K$ — полное входное сопротивление устройства, присоединённого к выходному концу кабеля (являющегося входным сопротивлением подключаемого устройства);

z — путь, проходимый рентгеновским излучением в контролируемой среде;

$\bar{z}$ — показатель степени основной размерности времени в размерности физической величины или константы.

Греческий алфавит

$\alpha_{\text{ос}}$ — коэффициент ослабления (затухания) электрического сигнала в кабеле;

$\alpha_{\text{П}}$ — угол наклона к оси X прямой, касательной к линии с уравнением $Y(X)$ на носителе информации, являющейся отображением перемещения некоторого объекта во времени;

$\alpha_{\text{ув}}$ — константа в законе затухания интенсивности ударной волны в конденсированной среде;

β — коэффициент нагрузки (отношение массы ВВ к массе тела, метаемого продуктами детонации этого ВВ);

$\beta_{\text{РЕГ}}$ — коэффициент увеличения, принятый в оптических и рентгенографических (рентгеноимпульсных) методах регистрации равным отношению размера изображения к размеру изображаемого оригинала (объекта съёмки);

Γ — коэффициент Грюнайзена;

$\gamma_{\text{рд}}$ — угол наклона чувствительного резистивного элемента реостатного датчика к вектору скорости контролируемого объекта;

γ^0 — угол наклона к оси симметрии течения траектории (в меридиональной плоскости) точки пересечения плоского фронта ударной волны с фронтом боковой волны разрежения;

γ_i — показатель степени переменных величин в выражении условия однородности уравнения относительно размерностей;

γ_0^* — угол, дополняющий угол падения луча света на плоскость до значения $\pi/2$;

Δ — доверительная погрешность измерения или просто, изменение физической величины;

$\Delta_{\text{пр}}$ — погрешность измерения давления датчиком с пьезоэлементом (в процентах);

$\Delta_{\text{ув}}$ — ширина фронта ударной волны;

Δh — толщина одинаковых пластин, как дискретное изменение лагранжевой координаты в направлении распространения ударной волны;

Δt_{Φ} — запаздывание гармонического сигнала, обусловленное сдвигом сигнала по фазе;

$\Delta U_{\text{Вых}}$ — изменение выходного напряжения (отклик измерительной системы на воздействие, оказываемое на датчик);

$\Delta u, \Delta p$ — изменение массовой скорости и давления соответственно;

δ — толщина слоя материала (инертного конденсированного или листового взрывчатого вещества), толщина зазора между пластинами или оболочками;

$\delta_{\text{ВОЗ}}$ — толщина воздушного зазора;

$\delta_{\Gamma}^{\text{НР}}$ — «геометрический» компонент нерезкости рентгеноимпульсного изображения, обусловленный диаметром иглы анода;

$\delta_{\text{Дат}}$ — толщина чувствительного элемента датчика;

$\delta_{\text{ДГ}}$ — толщина ослабителя детонационного генератора, отделяющего листовое взрывчатое вещество или стержни из него от нагружаемой среды;

$\delta_{\text{И}}$ — толщина изоляции датчика;

$\delta_{\text{МАН}}$ — толщина манганиновой фольги;

$\delta_{\text{ОБ}}$ — толщина оболочки взрывной камеры;

$\delta_{\text{ПС}}$ — толщина слоя передаточной среды (среды, передающей давление от продуктов детонации или экрана к исследуемому образцу), имеющей динамическую сжимаемость по возможности наиболее близкую к сжимаемости исследуемого материала;

$\delta_{\text{У}}$ — высота ударника (продольный размер в направлении его движения);

$\delta_{\text{ХП}}$ — ширина зоны химпика;

$\delta_{\text{ХПП}}$ — глубина преграды (измеряемая от поверхности контакта с детонирующим зарядом), на которую распространяется влияние параметров состояния реагирующего вещества в химпике;

$\delta_{\text{ЭКС}}^{\text{НР}}$ — компонент нерезкости рентгеноимпульсного изображения, обусловленный длительностью импульса излучения (временем экспозиции);

ε — диэлектрическая проницаемость;

ε_0 — электрическая постоянная;

$\eta_{\text{ХР}}$ — скорость химической реакции (разложения взрывчатого вещества);

θ — угол поворота контактной плоскости, разделяющей заряд ВВ и нагружаемую среду; угол поворота пластины, метаемой продуктами скользящей детонационной волны;

$\theta_{\text{ОК}}$ — угол у основания конуса;

Λ — функция переменных $\chi_1, \chi_2, \dots$;

λ — длина волны света;

μ — средняя молярная масса продуктов горения или детонации;

μ_0 — магнитная постоянная;

μ_a — коэффициент поглощения;

$\mu_{\text{Вяз}}$ — динамический коэффициент вязкости;

$\nu_{\text{Вяз}}$ — коэффициент кинематической вязкости;

- ν_3 — частота вращения зеркала;
 $\Pi_1, \Pi_2 \dots$ — безразмерные комплексы;
 ρ — плотность;
 σ — напряжение;
 $[\sigma]_{\text{доп}}$ — допустимое напряжение;
 $\sigma_{\text{сж}}$ — предельное напряжение при сжатии;
 $\sigma_{\text{упр}}$ — предел упругости;
 σ_N — предельное напряжение с учетом цикличности знакопеременной нагрузки;
 τ — характерное время;
 $\tau_{\text{тз}}$ — время нарастания давления в материале чувствительного элемента датчика, вложенного в контролируемую среду, сжимаемую ударной или детонационной волной (называемое временем газодинамического завала переднего фронта ударно-волнового импульса давления);
 τ_3 — время завала переднего фронта электрического сигнала, поступающего на вход осциллографа;
 τ_p — запаздывание момента возникновения контакта проволочного резистивного элемента реостатного датчика с корпусом датчика в том месте («точке»), где через него проходит поверхность регистрируемого фронта ударной волны;
 $\tau_{\text{ув}}$ — время сжатия вещества во фронте ударной волны от начального до конечного, амплитудного значения давления;
 $\tau_{\text{ут}}$ — время утечки электрического заряда с заряженного конденсатора;
 $\tau_{\text{эз}}$ — время электрического завала фронта сигнала;
 $\tau_{\text{хп}}$ — длительность химпика (или длительность химической реакции, выделяющей детонационную теплоту взрыва);
 $\tau_{\text{хпп}}$ — длительность фазы повышенной интенсивности фронта ударной волны в преграде, отображающая длительность химпика $\tau_{\text{хп}}$;
 τ_{wu} — масштаб времени разгона ударника продуктами детонации;
 τ_{δ} — время двукратного пробега волны между поверхностями слоя вещества толщиной δ ;
 τ_+ — характерное время взрывной волны (длительность положительной фазы давления);
 $\Phi_{\text{вх}}^*$ — входной световой поток;
 $\Phi_{\text{вых}}^*$ — выходной световой поток;
 $\Phi_{\text{вых0}}$ — сдвиг выходного сигнала по фазе;
 φ — угол подхода фронта детонационной или ударной волны к плоскости нагружаемой среды или к свободной поверхности;
 φ_r — рабочий угол развертки, или угол между двумя лучами, отражаемыми от вращающегося зеркала скоростной съёмочной камеры, один из которых попадает на начало рабочей части киноплёнки, а другой — на её конец;
 φ_c — угол отклонения луча света;

χ_U — угол между поверхностями соударения двух тел;
 χ — размерная физическая величина или константа (при анализе размерностей);
 ω_{UV} — константа в законе затухания интенсивности ударной волны в экране;
 ω — угловая скорость;
 ω_3 — угловая скорость вращения зеркала.

ПРИЛОЖЕНИЕ

Латинский и греческий алфавиты

A_0 и A_1 — коэффициенты в уравнении приближенной регрессии $y = A_0 + A_1x$;

a — значение параметра в законе распределения случайной величины, являющегося ее математическим ожиданием;

a_y — значение параметра закона распределения случайной величины η (равное ее математическому ожиданию), зависящей от некоторой входной переменной x ;

$a_y = \varphi_y(x)$ — регрессия, или истинная зависимость случайной величины η от случайной величины ξ , которые принимают значения, соответственно y_1 и x_1 , y_2 и $x_2, \dots, y_n$ и x_n ;

B — измерительная база при нахождении скорости тела или непосредственно наблюдаемая или измеряемая величина, которая используется для нахождения значений косвенно измеряемой величины;

C_0 — константа, используемая для упрощения вычислений при обработке результатов исследований;

C — некоторое значение константы, которая превышает значение математического ожидания или, наоборот, которую превышает математическое ожидание, а так же константа, на которую отличаются математические ожидания двух случайных величин;

$D\xi$ — дисперсия случайной величины ξ ;

d — остаток: разница фактической ординаты некоторой точки и ординаты, вычисляемой при том же значении абсциссы по формуле для приближенной регрессии;

$\bar{d}$ — случайная величина, используемая для проверки нормальности распределения случайной величины на основании результатов ее наблюдения;

$d_{1-\frac{\alpha}{2}}$ — квантили распределения случайной величины $\bar{d}$, используемые при проверке нормальности распределения некоторой случайной величины, на основании результатов ее наблюдения;

$\bar{F}(x)$ — функция распределения случайной величины, или интегральный закон распределения этой величины;

F — соотношение дисперсий, подчиняющееся закону распределения Фишера; $F_\alpha(\nu_1, \nu_2) = F(\nu_1, \nu_2, \alpha) = F(\nu_1, \nu_2, (1 - P))$ — квантиль распределения Фишера, или коэффициент распределения Фишера (ν_1, ν_2 —

числа степеней свободы, α — уровень значимости, P — доверительная вероятность);

$f(x)$ — плотность распределения случайной величины, или дифференциальный закон распределения этой величины;

h_i — частота наблюдений значений, лежащих в заданном интервале $x_i \pm \Delta x/2$ ($h_i = n_i/\Sigma n_i$);

M_ξ — математическое ожидание случайной величины ξ ;

m — количество наблюдений величины y ;

n — количество наблюдений случайной величины, или количество результатов наблюдений, случайным образом «выбираемых» из генеральной совокупности значений x некоторой случайной величины;

n_i — количество результатов наблюдений, попавших в заданный класс значений, лежащих в интервале $(x_i - \Delta x/2, x_i + \Delta x/2)$.

n_{us} — количество разностей $|x_i - \bar{x}|$, значение которых превосходит значение произведения $u_{P/2} S_x$;

P — вероятность;

P — доверительная вероятность;

r — выборочное значение коэффициента корреляции;

S_x — среднеквадратичное наблюдения случайной величины;

$S_{\bar{x}}$ — среднеквадратичное измерения случайной величины;

t — случайная величина, подчиняющаяся закону распределения Стьюдента;

$t_{1-\frac{P}{2}} = t_{1-\frac{\alpha}{2}} = t_{1+\frac{P}{2}}(\nu) = t_{1-\frac{\alpha}{2}}(\nu) = t(\nu, P) = t(\nu, \alpha)$ — обозначения квантилей или коэффициентов распределения Стьюдента (ν_1, ν_2 — числа степеней свободы, α — уровень значимости, P — доверительная вероятность);

t_y — время в примере анализируемого физического процесса удара, рассматриваемое как значение случайной величины;

$u_P, u_{1+\frac{P}{2}}, u_{1-\frac{P}{2}}, u_{1-\frac{P}{2}}, u_{\frac{P}{2}}$ — обозначения квантилей нормального распределения нормированной величины;

v_P — квантиль нормального распределения ненормированной случайной величины;

W — статистический вес результата измерения координаты экспериментальной (фактической) точки после преобразования этой координаты по формуле выравнивающей замены переменных;

W_y — скорость ударника в примере с физическим процессом, рассматриваемая как случайная величина;

ω — статистический вес измерения;

x — значение случайной величины, являющееся результатом ее наблюдения;

$\bar{x}$ — среднее выборки, или выборочное среднее;

Y — значение результата преобразования координаты экспериментальной (фактической) точки по формуле выравнивающей замены переменных;

$Y_{\text{инд}}$ — ордината точки, принадлежащей границе доверительной области предсказываемых значений фактических, или индивидуальных, откликов, получаемых при заданных значениях входной переменной;

$Y_{\text{рег}}$ — ордината точки, принадлежащей границе доверительной области расположения линейной регрессии;

$\bar{y}$ — среднее значение всех измерений при всех реализованных уровнях некоторого фактора, влияние которого анализируется;

Z — значение косвенно измеряемой случайной величины;

$\bar{z}$ — среднее значение косвенно измеряемой случайной величины;

α — уровень значимости;

Δ — результирующая погрешность измерения;

ε — случайная погрешность измерения;

θ — систематическая неисключаемая погрешность;

θ_i — граница i -й неисключаемой систематической погрешности;

ξ — случайная величина;

ξ_0 — нормированная случайная величина;

ξ_P — квантиль.

Индексы:

АО — акустический отвод;

В — высокое (давление), внутреннее;

ВХ — входной;

ВЫХ — выходной;

Г — геометрический (завал);

ГЗ — газодинамический (завал);

З — заряд (завал);

ИН — инициирующий;

ИС — исследуемый;

ИР — искаженная регистрация

ИЧ — исследуемая часть;

КР — кратер;

КС — конденсированная среда;

Л* — лагранжева;

Л — волна, обращенная влево;

М — мишень;

Н — нарастание наружное; низкое;

НИ — начальный импульс;

НС — наружная среда;

ПС — передаточная среда;

П — преграда или волна, обращенная вправо;

ПОВ — поворот детонации;

ПР — пересжатый режим;

Р — разрежение (разгрузка);

Ч — переходная часть;

Р — разрежение, разгрузка;

РГ — рабочий газ;

СТВ — ствол;
СТР — струя;
Т — тарифовка;
У — ударник;
Ф — фронт ударной волны;
ХМ — химпик;
ХПП — состояние в преграде, отображающее состояние в химпике;
ЧЖ — состояние на поверхности Чепмена–Жуге;
ЧЖП — состояние в преграде, отображающее состояние на поверхности Чепмена–Жуге;
Э — экран;
сг — критический;
е — конденсированное исходное состояние взрывчатого вещества;
М — индекс параметра состояния движения, характеризующего положения точки М в $(p-u)$ -координатах;
m — индекс характерного значения давления начального импульса (максимум давления или уровень постоянно действующего давления) или характерного времени начального импульса (длительности существования постоянного уровня давления);
g — продукты разложения ВВ (газообразные);
st — стандартные условия состояния вещества.

Сокращения и обозначения:

БЭД — быстродействующий детонатор;
ВВ — взрывчатое вещество;
ВГ — волновой генератор;
ВРОЛ, ВРОП — волна разрежения, обращенная влево (Л) и вправо (П);
ВСОЛ, ВСОП — волна сжатия, обращенная влево (Л) и вправо (П);
ВИР — волна изоэнтропического разрежения;
ВИС — волна изоэнтропического сжатия;
ВР — волна разрежения;
ВС — волна сжатия;
ЗХП — зона химпика;
ИВВ — инициирующее взрывчатое вещество;
ИНТ — источник накопительного типа;
КС — конденсированная среда;
ЛВВ — листовое ВВ;
ЛВДГ — линейноволновой детонационный генератор;
НИ — начальный импульс;
НС — нагружаемая среда;
ПВГ — плосковолновой генератор;
ПВДГ — плосковолновой детонационный генератор;
ПДВ — падающая детонационная волна;
ПД — продукты детонации;
ПИ — плоскость инициирования детонации;
ППНИ — плоскость приложения начального импульса;

СДВ — скользящая детонационная волна;

СФР — скоростной фоторегистр (съёмочная камера для высокоскоростной съёмки);

ТИ — точка инициирования;

УДВ — уходящая детонационная волна;

УВОЛ, УВОП — ударная волна, обращенная влево (Л) и вправо (П);

УВС — ударноволновое сжатие;

ФУВ — фронт ударной волны;

ЦТС — цирконат титанат свинца (пьезокерамика);

ЭД — электродетонатор;

ЭКД — электроконтактный датчик;

XS — гнездо высокочастотного разъема.

В буквенных обозначениях возмущений в пространственно-временных диаграммах, отображаемых на диаграммах состояний движения, первый символ (Л или П) обозначает направление обращенности волны, а второй символ обозначает материал или компонент анализируемой системы, по которой распространяется возмущение. При этом третий символ (в круглых скобках) означает начальное состояние движения, отмеченное в $(p-u)$ -координатах, которое изменяется на новое в результате прохождения возмущения. Например, ЛУ(2) — волна, обращенная влево, распространяется по материалу ударника, который находится в состоянии движения (точка 2 на $(p-u)$ -диаграмме).

Введение

Газовая динамика, или газодинамика, является физико-математической дисциплиной, исследующей движение любых сжимаемых сред, включая жидкие и твердые, сжимаемость которых в отличие от газов проявляется при больших давлениях.

Газодинамику относят к разделу науки о быстропотекающих процессах. Это вызвано двумя причинами.

Первая связана с тем, что собственно газодинамика, или классическая газодинамика, изучает свойство сжимаемости, которое в реальных процессах часто проявляется в сопровождении целого ряда эффектов: полиморфных и фазовых превращений, химических реакций и других дополнительных физических или химических явлений. Поэтому свойство сжимаемости может быть выделено и изучено независимо от других (свойств), если изменение состояния среды происходит достаточно быстро — за время, которое много меньше характерного времени протекания этих дополнительных явлений.

Вместе с тем изучение самих дополнительных к газодинамическим процессов, время протекания которых очень мало по абсолютной шкале времени (сгорание пороха в артиллерийском оружии, превращение твердого ВВ в газообразные продукты детонации), зависящих от газодинамических эффектов и в то же время влияющих на газодинамические характеристики течения, представляет самостоятельный интерес и имеет большое практическое значение. Это — вторая причина. Она вызывает появление, например, таких разделов науки о быстропотекающих процессах, как газодинамика горения и химическая газодинамика, изучающие процессы в ударных и детонационных волнах.

Экспериментальные и теоретические направления исследований, выделяемые из газодинамики в целом, рассматривают как установившиеся движения среды (когда в заданной области пространства, где изучается движение, параметры состояния и движения не изменяются во времени), так и неуставившиеся движения (когда эти параметры меняются во времени). Следует заметить, что установившееся движение часто, и неудачно, называют стационарным движением.

Неустановившиеся движения, или течения, в практике реализуются при взрыве и детонации взрывчатых веществ, при зарождении и распространении ударных волн, при воздействиях ударных волн на преграды, при высокоскоростном соударении тел. Мы в нашей книге будем рассматривать методы и устройства, позволяющие исследовать неустановившиеся движения сред применительно к задачам, которые возникали и возникают в области техники и физики взрыва и удара. При решении таких задач в равной степени важны как теоретические, так и экспериментальные направления исследований.

На стадии формирования газодинамики, как науки, результаты экспериментов были основой для последующих теоретических обобщений. Эти основополагающие экспериментальные исследования были выполнены в конце XIX в. при изучении сжимаемости газов применительно к проблемам совершенствования артиллерии и, особенно, при изучении проблемы повышения безопасности подземных работ, обострившейся с учащением катастрофических взрывов газовых и пылевых смесей. В ходе этих работ, выполненных в конце XIX – начале XX веков, эксперимент приобрел черты, встречающиеся в настоящее время (так, например, Вьелем была изобретена и начала использоваться при исследованиях распространения детонационной волны в газах ударная труба, чье название было связано с отождествлением в то время детонационной и ударной волн). Важнейшие экспериментальные результаты на стадии становления газодинамики были получены учеными-инженерами Гюгоньо и Жуге, ученым-артиллеристом Маиевским, физиком Махом.

Открытие явления детонации в конденсированных веществах, которые стали рассматриваться и использоваться как новые сверхмощные источники энергии, инициировало экспериментальные исследования, направленные на выявление механизма этого явления и количественное описание характеристик конденсированных взрывчатых веществ на уровне представлений, удовлетворяющих запросам практики взрывных работ, и создание военной техники того времени. При этом в экспериментах использовались в основном механические измерительные устройства. Так, при измерении давления, развиваемого при взрыве и даже детонации, для реализации «динамического метода измерения» использовался акселеографический прибор. При этом давление находилось по записи перемещения во времени поршня определенной массы под действием давления газов, отображаемого ускорением движения (запись представляла собой кривую, оставляемую на закопченной пластинке). При «статическом методе измерения» использовался обычно крешер Нобля, предложенный им еще в 1868 г. Этот прибор позволял находить конечное максимальное давление, действующее на поршень, который вызывал сжатие небольших медных цилиндров. Были разработаны методы учета инерционности поршня в зависимости от скорости нарастания давления и нахождения максимума регистрируемого давления на основании измерения величины уменьшения высоты цилиндра (обжата крешерного столбика).

Представление о том, как в то время исследовалась детонация, в частности, измерялось давление в продуктах детонации, дают эксперименты, проведенные И.М. Чельцовым (совместно с П.Я. Назаровым) в лаборатории минного офицерского класса в Кронштадте. В этих экспериментах сравнивались значения давлений, развиваемых при подводном взрыве различных веществ. Исследуемые заряды на растяжках помещались в центре металлического кольца, называемого кольцом Аббота, с равномерно расположенными на нем шестью крешерами,

поршни которых обращены к заряду. С использованием представлений о мгновенной детонации и о пренебрежимо малой сжимаемости воды в сферически симметричном «волновом движении» вокруг заряда И.М. Чельцов теоретически установил связь давлений в продуктах детонации $p_{\text{пд}}$ и в воде $p_{\text{вода}}$ в точке, удаленной от центра симметрии на расстояние $\bar{r}$ (в долях радиуса заряда) от центра симметрии: $p_{\text{пд}} = p_{\text{вода}} \bar{r}$.

В результате обработки результатов эксперимента (обжатие медных цилиндров), например, было показано, что давление продуктов взрыва заряда пироксилина плотностью приблизительно 1 г/см^3 равно $1,7 \text{ ГПа}$.

Теория детонации, разработанная позже, показала, что начальное давление продуктов детонации, появляющихся на фронте реальной детонационной волны, ровно вдвое превышает давление мгновенной детонации. На основании этого можно заключить, что эксперименты И.М. Чельцова и предложенный им алгоритм обработки результатов опыта при использовании теории детонации позволили бы дать оценку давления на фронте детонационной волны в пироксилине насыпной плотности: $3,4 \text{ ГПа}$.

Этот результат можно считать удовлетворительно согласующимся с современными результатами определения давления на фронте установившейся детонационной волны в низкоплотных зарядах взрывчатых веществ, если учесть возможность проявления неидеальности инициирования детонации в зарядах малых размеров, приводящей к заметному снижению параметров ускоряющейся взрывной реакции по отношению к характеристикам установившейся детонации. Но использование этого метода определения давления детонации в случае высокоплотных мощных взрывчатых веществ приводило бы к недопустимым погрешностям, связанным с отсутствием учета сжимаемости воды при больших давлениях.

Методы определения параметров детонации высокоплотных мощных конденсированных веществ, дающие достаточно достоверные результаты, были разработаны к сороковым годам XX в. Появление этих и других экспериментальных методов определения газодинамических характеристик, используемых до настоящего времени, связано с новым качественным скачком в развитии газодинамики взрывных и ударных процессов, вызванным разработками ядерных взрывных устройств. Установление параметров конструкций этих устройств традиционным, сугубо эмпирическим методом проб и ошибок, стало недопустимым, хотя бы по экономическим соображениям. Возникла крайняя необходимость нахождения условий сжатия определенных радиоактивных металлов и сферических оболочек из них в компактные образования (наиболее предпочтительной шаровой формы), имеющие высокую плотность, и поддержания этой высокой плотности в течение такого времени, что начавшаяся цепная реакция деления ядер успеет выделить достаточное количество энергии до момента, при котором начавшееся

расширение делящегося материала вызовет замедление цепной реакции. Составной частью начального решения этой проблемы было создание метода газодинамического расчета характеристик сжатия металлов в зависимости от параметров конструкции взрывного устройства и его материалов, в частности, взрывчатого вещества. Подобные методы расчета необходимых параметров конструкции в настоящее время применяются уже для широкого круга разновидностей взрывных устройств и технологических операций с использованием только энергии химических взрывчатых веществ или высокоскоростного удара.

При этом решается система уравнений движения сплошной сжимаемой среды, основанных на трех фундаментальных законах (законах сохранения массы, импульса и энергии), замыкаемая уравнением состояния (функциональная связь удельной энергии, давления и плотности) для материалов конструкции и продуктов детонации (если сжатие достигается энергией взрыва).

При расчетах инженерной направленности необходимы надежные и достаточно точные в количественном отношении уравнения состояния продуктов детонации активного заряда взрывчатого вещества и уравнения состояния инертных материалов конструкции. Такие уравнения состояния до настоящего времени получают полуэмпирическими методами, в основе построения которых лежат соответственно:

- а) эксперименты по определению параметров детонации и изоэнтроп разрежения ее продуктов;
- б) эксперименты по нахождению характеристик сжимаемости в ударных волнах (ударные адиабаты, или уравнения Гюгоньо, материала).

Необходимые измерения в этих экспериментах осуществлялись уже с использованием измерительных систем, основанных не на механическом принципе действия, а на электрических, оптических и рентгенографических эффектах, что позволило регистрировать особенности газодинамических процессов длительностью не в десятки, а в единицы микросекунд и даже десятые–сотые доли микросекунды.

Значительная часть работ, имевших важнейшее значение для науки и техники и отличавшихся высокой точностью и достоверностью результатов, была выполнена с использованием измерений только кинематических характеристик газодинамических ударноволновых процессов: скорости фронта волны D и массовой скорости (скорости частиц) u вещества на этом фронте. Первым электрическим методом измерения величин D и u , отличавшимся высокой надежностью и точностью регистрации, стал электроконтактный метод игольчатых датчиков, разработанный в 1945 г. Это был дискретный метод, позволявший непосредственно и с очень высокой точностью фиксировать моменты начала движения естественных свободных «наружных» поверхностей металлических образцов или «искусственно» создаваемых свободных поверхностей в глубине этих образцов (например, торцов глухих узких отверстий).

Рентгеноимпульсные установки индивидуального лабораторного изготовления, в принципе позволяющие непосредственно регистрировать и измерять изменения плотности среды в газодинамических процессах, в это время также использовались для измерений только кинематических характеристик течения конденсированных сред.

В этот начальный период газодинамических экспериментальных исследований, связанных с созданием ядерных взрывных устройств (прежде всего, военного назначения) были разработаны промышленно изготавливаемые камеры высокоскоростной оптической регистрации процессов, позволяющие различать друг от друга события, следующие с интервалом порядка 10^{-8} с.

Несколько позже в газодинамических экспериментах с конденсированными взрывчатыми веществами, металлами и другими конденсированными веществами стали применять более сложные электрические измерительные системы с датчиками различных принципов действия. Эти датчики вкладывались в изучаемые материалы и позволяли в течение единиц микросекунд осуществлять непрерывную регистрацию параметров состояния движения, например, массовой скорости (магнитозлектрический датчик) или давления (пьезорезистивный манганиновый датчик). С использованием таких датчиков стало возможно детально исследовать сугубо неустановившиеся процессы, в частности, извлекать информацию об изменении степени разложения вещества, претерпевающего химическую реакцию в процессе распространения по нему ударной волны.

Также были разработаны электрические методы, в которых использовались безынерционные датчики, предназначенные для непрерывной высокоточной регистрации либо скорости движения свободной поверхности металлических (емкостной датчик) образцов, либо давления на поверхности контакта контролируемой среды с чувствительным материалом (пьезоэлектрические монокристаллические датчики, подключаемые к остальным элементам измерительной системы в токовом режиме). Эти измерительные системы позволили исследовать особенности влияния свойств твердых материалов на их сжимаемость, а также на так называемое откольное разрушение в волнах разрежения, сопровождающих ударно-волновое сжатие. Результаты экспериментального изучения этих особенностей образуют базу данных, без которых невозможно практически ценное математическое моделирование (с использованием компьютерной техники) поведения конструкции боеприпасов в условиях воздействий высокоскоростным ударом, взрывом, импульсами мощного лазерного (в том числе и рентгеновского) и корпускулярного излучения.

В настоящее время исследования влияния упругопластических и вязких свойств на особенности сжатия и разрежения конструкционных материалов проводятся уже с использованием лазерных интерферометрических измерительных систем.

Достижение высокой точности нахождения характеристик процессов в исследуемых средах с помощью разработанных измерительных систем было бы невозможно без создания устройств генерации воздействия на объект исследования, приводящих к плоскосимметричному слабо затухающему течению в окрестности чувствительных элементов измерительных систем. В то же время необходимость и стремление расширить диапазон исследованных экстремальных состояний сред привели к созданию устройств, генерирующих в объекте исследования цилиндрические или сферические сходящиеся ударные волны. Подобные устройства позволяют реализовать воздействия, приводящие к более чем трехкратному повышению плотности металлов и исследовать сжимаемость материалов при таких экстремальных состояниях веществ.

Областями приложения результатов разработки различных измерительных систем и устройств генерации воздействий с фронтом ударных волн разной интенсивности сжатия и формы в настоящее время являются не только исследования процессов, определяющих функционирование средств вооружений с различными источниками энергии, и исследования широкого круга взрывных технологий в промышленности, но также фундаментальные исследования в физике твердого тела, плазмы, прочности и пластичности, в геофизике, в химической физике и других областях знания.

В настоящее время, когда в научных исследованиях и технических разработках широко используется математическое моделирование, роль газодинамических экспериментов сводится:

- а) к нахождению значений констант и других параметров математических моделей, теоретическое вычисление которых еще невозможно или нецелесообразно;
- б) к проверке теоретически полученных результатов, но чаще всего к накоплению информации, используемой при настройке эффективных значений параметров математических моделей;
- в) к «чисто эмпирическому» установлению закономерностей, эффектов и проявлений процессов, которые становятся основанием для пересмотра теоретических представлений (и обобщений) и разработки принципиально новых математических моделей процессов.

Краткое знакомство с историей развития экспериментальных методов решения газодинамических задач показывает, что своевременное достижение значительных научных и технических результатов чаще всего достигалось не только оптимальным сочетанием свойств объектов исследования, качеств измерительных систем и устройств воздействий на объекты исследований. Успехи в достижении целей исследований и измерений в значительной мере были связаны с остроумностью алгоритмов решения новых задач на базе уже известных и отработанных ранее технических систем и их элементов. При этом от разработчика экспериментов требовались разносторонние знания не

только в области техники, но и, не в последнюю очередь, в области теории газодинамики.

Совокупность сведений об измерительных системах, позволяющих находить области их рационального применения, об устройствах воздействий на объекты, вызывающих изучаемые процессы, о способах варьирования параметрами воздействий на объекты исследований и, наконец, о теоретических основах газодинамики в минимальном объеме, необходимом для разработки экспериментов и интерпретации их результатов, образует основное содержание технической дисциплины, называемой нами *экспериментальная газодинамика процессов взрыва и удара*, или, коротко, *экспериментальная газодинамика*.

Написание учебного пособия провели: введение — С.Г. Андреев; § 1 — С.Г. Андреев, М.М. Бойко, В.В. Селиванов; § 2, 3 — С.Г. Андреев, М.М. Бойко; § 4–10 — С.Г. Андреев; § 11 — С.Г. Андреев, М.М. Бойко; § 12–21 — С.Г. Андреев; § 22, 23 — С.Г. Андреев, В.В. Селиванов; § 24–27 — С.Г. Андреев.

Авторы считают своим приятным долгом засвидетельствовать свою искреннюю признательность коллегам, результаты работ которых были использованы при выполнении иллюстраций: В.А. Летягину, В.В. Зюзину, А.И. Чернову, А.Е. Новицкому, А.В. Левантовскому, В.А. Брыкову, В.В. Сапрыкину, Н.В. Палий, Е.Ф. Грязнову, С.А. Петровскому, и выразить свою благодарность своему учителю профессору В.С. Соловьеву.

Глава 1

ОСНОВНЫЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ О СЖИМАЕМОСТИ КОНДЕНСИРОВАННЫХ СРЕД

В настоящем разделе излагаются основные сведения о газодинамических процессах и некоторых газодинамических характеристиках веществ, главным образом конденсированных: жидких или твердых, но обладающих прочностью или твердостью, при которых они ведут себя еще подобно жидкости, если давления внешних воздействий являются «умеренными», т.е. равны ориентировочно 2...20 ГПа. Эти сведения необходимы для выполнения расчетных оценок параметров газодинамических процессов на стадии разработки и подготовки экспериментов, интерпретации и обработки их результатов. Приведенные характеристики процессов и веществ являются предметом изучения в курсе прикладной газодинамики и поэтому излагаются здесь как справочная информация, сопровождаемая некоторыми пояснениями, в том числе, на качественном уровне.

§ 1. Основные представления об ударно-волновом сжатии

Перед тем, как привести необходимые формулы, рассмотрим соударение торцами двух цилиндрических тел, сделанных из одного и того же химически инертного материала, прочностью которого можно пренебречь. Первое тело, покоящееся до соударения, назовем мишенью, а тело, налетающее на него со скоростью W_y , назовем ударником. Границы тел до момента их соударения показаны штриховыми линиями (рис. 1.1, а).

При внезапном контакте двух идеально плоских и параллельных торцов тел произошло бы мгновенное изменение скорости частиц на плоскости соударения на величину $W_y/2$ (так как материалы обоих тел тождественны), сопровождаемое также мгновенным появлением на поверхности контакта давления $p_{ув}$. Возмущения среды (вещества тел), проявляемые, в частности, в изменении скорости частиц u и увеличении давления p , под которым они находятся, распространяются в обе стороны от плоскости контакта тел. Область сжатого состояния частиц под повышенным давлением p распространяется в направлении к свободным поверхностям тел. Если среда жидкая или ее предел

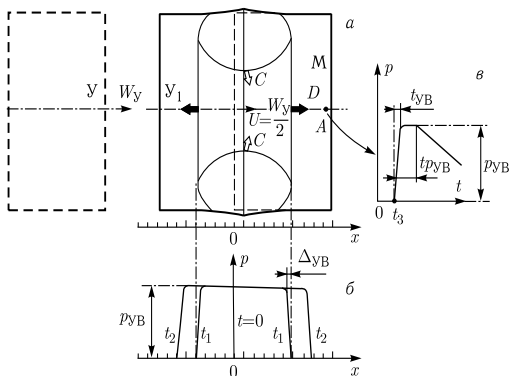


Рис. 1.1. Соударение торцами двух цилиндрических тел: *а* — ударник и мишень до соударения (штриховые линии) и в момент времени t_1 после возникновения контакта торцов; *б* — распределение давления вдоль оси ударника и мишени в три момента времени $t = 0$; $t_1 > 0$; $t_2 > t_1$; *в* — динамика давления в точке на оси симметрии мишени вблизи ее свободной поверхности; $У$ — ударник до соударения; $У_1$ — ударник в момент времени $t = t_1 > 0$; $М$ — мишень; D — фронт ударной волны и направление его движения; C — фронт волны разрежения (разгрузки) и направление его движения от боковой поверхности

текучести (прочности) много меньше, чем давление на плоскости соударения, то распределение давления вдоль осевой линии симметрии при таком распространении имеет вид, показанный на рис. 1.1, б. Этот рисунок показывает, что на небольшом расстоянии от плоскости соударения формируется зона перехода вещества от начального давления $p_0 \approx 0$ до конечного давления $p_{УВ}$, которая имеет постоянную ширину $\Delta_{УВ}$ и перемещается со скоростью D в направлении к свободным торцам ударника и мишени. Следует подчеркнуть, что здесь под D мы понимаем скорость перемещения переходной зоны шириной $\Delta_{УВ}$ относительно частиц, находящихся перед ней.

Для дальнейшего рассмотрения особенностей сжатия сред при соударении тел удобнее (проще) анализировать течение частиц в первоначально покоящейся мишени. При этом скорость D перемещения переходной зоны шириной $\Delta_{УВ}$, равно как и скорость частиц среды u , измеряется относительно лабораторной системы координат (или первоначально покоящихся частиц мишени). Если ширина переходной зоны $\Delta_{УВ}$ при заданном давлении $p_{УВ}$ устанавливается для среды «естественным» образом и определяется лишь структурой строения среды и особенностями поля межмолекулярного взаимодействия в ней, то

она называется шириной фронта ударной волны. При этом скорость D называют скоростью фронта ударной волны или, проще, скоростью ударной волны, а процесс перехода частиц вещества от начального невозмущенного состояния к конечному давлению $p_{ув}$ называют ударно-волновым сжатием.

Давление в частице среды, через которую проходит фронт ударной волны, нарастает от начального до конечного значения (рис. 1.1, *в*) за очень малое, но конечное время, приблизительно равное $\tau_{ув} = \Delta_{ув}/D$. Это время, называемое длительностью фронта ударной волны, так же как и ширина фронта $\Delta_{ув}$, практически не изменяется по мере распространения ударной волны с заданным давлением $p_{ув}$.

При описании распространения ударных волн оказывается возможным не рассматривать практически постоянную и очень узкую зону шириной $\Delta_{ув}$, а заменять ее условной поверхностью (плоскостью) разрыва характеристик состояния среды. Перед этой поверхностью фронта ударной волны вещество имеет плотность ρ_0 , удельный объем v_0 , скорость частиц u_0 , находится под давлением p_0 , а его внутренняя удельная энергия равна e_0 . Переход вещества в состояние непосредственно за фронтом ударной волны, характеризуемое удельным объемом $v_{ув}$, плотностью $\rho_{ув}$, скоростью частиц $u_{ув}$, давлением $p_{ув}$ и удельной внутренней энергией $e_{ув}$, при этом полагают мгновенным, принимая $\tau_{ув} = 0$.

Если ударная волна распространяется по покоящемуся веществу ($u_0 = 0$) и ее давление на фронте на три и более порядков превышает p_0 , то уравнения сохранения импульса, массы и энергии при ударно-волновом сжатии имеют вид:

$$p_{ув} = \rho_0 u_{ув} D, \quad (1.1)$$

$$v_{ув} = \frac{v_0(D - u_{ув})}{D}, \quad (1.2)$$

$$e_{ув} - e_0 = \frac{p_{ув}(v_0 - v_{ув})}{D}. \quad (1.3)$$

При анализе ударно-волнового сжатия возникает необходимость построения зависимости между двумя переменными, характеризующими состояние вещества непосредственно за фронтом ударной волны (в дальнейшем будем использовать наиболее употребительный термин — на фронте ударной волны). Для получения такой возможности систему из трех написанных уравнений дополняют четвертым. В случае конденсированных веществ в качестве такого уравнения часто используют экспериментально устанавливаемую связь между скоростью фронта ударной волны в мишени D и скоростью частиц $u_{ув}$ на фронте этой волны:

$$D = D(u_{ув}). \quad (1.4)$$

Последнее уравнение называют ударной адиабатой, связывающей волновую D и массовую $u_{ув}$ скорости. Мы в дальнейшем также будем

использовать термин «массовая скорость» наряду с термином «скорость частиц» среды.

Наиболее точно экспериментальные результаты для конденсированных сред аппроксимируют зависимостью

$$D = c_0 + b \cdot u_{\text{УВ}} - 0,1 \cdot u_{\text{УВ}}^2,$$

где c_0 — объемная скорость звука, соответствующая начальной адиабатической объемной сжимаемости вещества; b — коэффициент, значение которого ориентировочно равно 1,5...2.

Однако на практике чаще используют более простые зависимости:

$$D = a + b \cdot u_{\text{УВ}}, \quad (1.5)$$

в которых константа a может иметь значение, несколько отличное от c_0 .

В диапазоне низких давлений ударно-волнового сжатия принимают $a = c_0$, а в диапазоне умеренно повышенных давлений $a > c_0$ (часто $a = 1,2 c_0$).

Имея систему уравнений (1.1)–(1.4), мы можем, задавшись значением любой одной из пяти величин: ($p_{\text{УВ}}$, $u_{\text{УВ}}$, D , $v_{\text{УВ}}$, $e_{\text{УВ}}$), найти соответствующие ей значения остальных четырех величин из этих пяти.

Проведя простые алгебраические преобразования системы уравнений (1.1)–(1.4), можно получить выражение для ударной адиабаты в координатах давление–плотность:

$$p_{\text{УВ}} = \rho_0 a^2 \left(1 - \frac{\rho_0}{\rho_{\text{УВ}}} \right) \left(1 - b \left(1 - \frac{\rho_0}{\rho_{\text{УВ}}} \right) \right)^{-2}, \quad (1.6)$$

и уравнение, называемое ударной адиабатой в координатах «давление – массовая скорость»:

$$p_{\text{УВ}} = \rho_0 \cdot u_{\text{УВ}} (a + b \cdot u_{\text{УВ}}). \quad (1.7)$$

Из последнего уравнения получаем выражение, которое позволяет по давлению на фронте ударной волны $p_{\text{УВ}}$ найти массовую скорость $u_{\text{УВ}}$, если волна распространяется по неподвижной среде в положительном направлении оси x (рис. 1.1):

$$u_{\text{УВ}} = \frac{a}{2b} \left[\sqrt{1 + \frac{4b \cdot p_{\text{УВ}}}{\rho_0 a^2}} - 1 \right]. \quad (1.8)$$

Экспериментально определенная ударная адиабата $D = D(u_{\text{УВ}})$ позволяет найти уравнение состояния среды, при этом, исходя из общих теоретических представлений, задаются формой этого уравнения. Например, известна одна из простейших форм уравнения типа Ми–Грюнайзена:

$$p = p_X(v) + \Gamma \cdot \frac{C_v T}{v}, \quad (1.9)$$