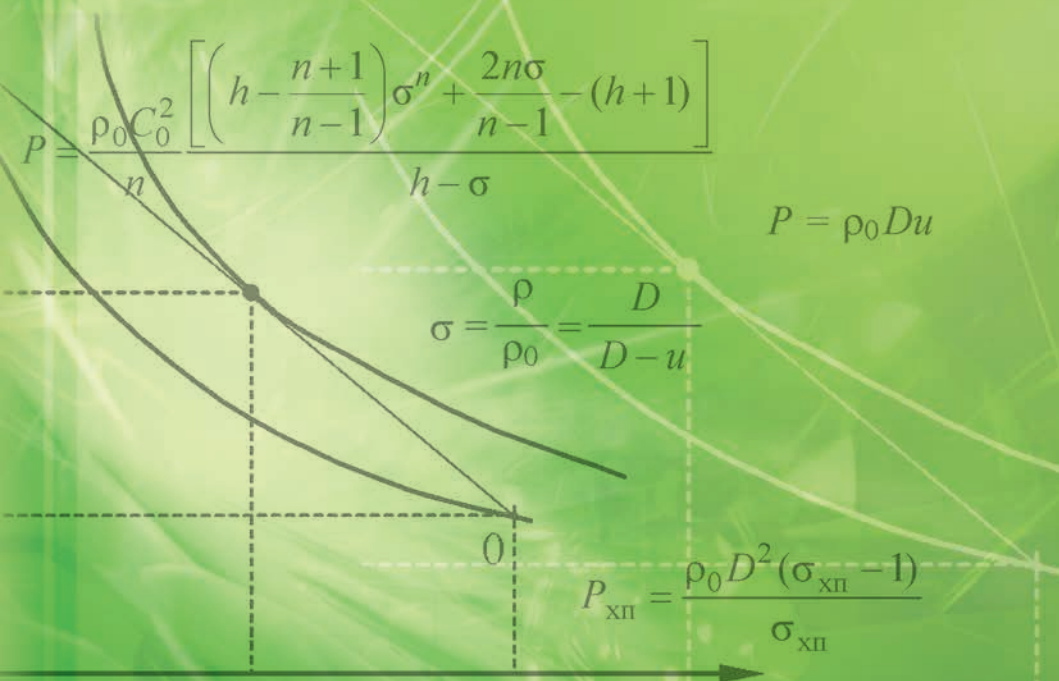


Б. Л. Глушак

НАЧАЛА ФИЗИКИ ВЗРЫВА



ФГУП «Российский федеральный ядерный центр –
Всероссийский научно-исследовательский институт
экспериментальной физики»

Б. Л. Глушак

НАЧАЛА ФИЗИКИ ВЗРЫВА

Учебное издание

Саров
2011

УДК 534.222.2 (075.8)
ББК 22.23я73
Г55

Глушак Б. Л.

Г55 Начала физики взрыва: Учебное издание. – Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2011. – 308 с.: ил.

ISBN 978-5-9515-0183-7

Учебное пособие написано на основе лекций, прочитанных автором по курсу «Физика взрыва» студентам Московского инженерно-физического института (отделение 4, г. Саров) в 1973-75 и 1993-95 годах.

Из всего многообразия явлений и процессов, традиционно относимых к физике взрыва как отрасли науки, в пособии нашли отражение те из них, которые характеризуют реакцию сплошной сжимаемой среды, окружающей источник быстрого выделения энергии.

Основное содержание составляет изложение начал волнового движения сплошной сжимаемой среды и анализ процессов, протекающих в ней при воздействии взрыва на окружающую среду. Материалы книги носят теоретический характер. Описание экспериментальных методов сводится к рассмотрению принципов, на которых они основаны. Основное внимание уделено волновым процессам в твердых телах, в частности в упругопластических средах, а также вопросам их разрушения.

Список литературы содержит в основном монографии, при обращении к которым можно найти множество ссылок на работы по рассматриваемому вопросу.

СОДЕРЖАНИЕ

Основные обозначения	5
Введение	7
Глава 1. Общие уравнения движения сплошной среды	11
1.1. Уравнения движения идеальной жидкости	11
1.2. Уравнения движения вязкой теплопроводной жидкости	18
1.3. Движение несжимаемой идеальной жидкости	26
1.4. Движение несжимаемой вязкой жидкости	37
1.5. Уравнения движения прочной сжимаемой среды	44
Глава 2. Одномерные непрерывные движения сжимаемых сред	68
2.1. Уравнения механики сплошной среды в случае малых возмущений	68
2.2. Акустические волны	72
2.3. Характеристики	80
2.4. Плоское изэнтропическое течение. Инварианты Римана	83
2.5. Простая волна	86
2.6. Волны сжатия и расширения	89
2.7. Преобразования подобия	98
Глава 3. Теория ударных волн	102
3.1. Основные соотношения на ударном разрыве	102
3.2. Плоская прямая ударная волна	107
3.3. Некоторые закономерности сжатия и течения в ударных волнах	114
3.4. Ударные волны малой интенсивности	119
3.5. Взаимодействие волн. Распад произвольного разрыва	124
3.6. Косая ударная волна	134
3.7. Устойчивость ударных волн	140
Глава 4. Теория детонационных волн	143
4.1. Типы взрывных процессов	143
4.2. Гидродинамическая теория детонационных волн	145
4.3. Уравнения состояния и изэнтропы продуктов взрыва конденсированных ВВ	150
4.4. Движение продуктов взрыва за фронтом детонационной волны	160
4.5. Начальные параметры ударных волн при взрывных процессах	181
4.6. Применение детонационных волн и энергии взрыва	193
Глава 5. Ударные волны и волны расширения в твердых телах (гидродинамическое приближение)	203
5.1. Сжатие сплошных твердых тел ударными волнами	203

5.2. Сжатие ударными волнами пористых веществ	210
5.3. Изэнтропическое расширение ударно сжатых твердых тел	214
5.4. Ударные волны и волны расширения при соударении твердых тел	224
5.5. Фазовые превращения в ударных волнах	230
5.6. Ударные волны разрежения	235
5.7. Сжатие смесей ударными волнами	238
5.8. Сильный взрыв в однородной атмосфере	240
5.9. Кумуляция энергии в плоских системах	242
5.10. Некоторые задачи двумерного движения	246
Глава 6. Ударные волны и волны расширения	
в упругопластических средах	252
6.1. Деформирование упругопластических тел в ударных волнах и волнах разгрузки	252
6.2. Структура ударной волны и волны разрежения в упругопластической среде	257
6.3. Упругий предвестник и динамическая прочность	261
6.4. Динамический предел текучести и упругие свойства металлов в ударных волнах	264
6.5. Модели пластического деформирования металлов в ударных волнах	268
6.6. Ударные адиабаты упругопластических тел	274
6.7. Сходящаяся и расходящаяся ударные волны в упругопластической среде	280
6.8. Откольное разрушение конструкционных материалов	283
6.9. Разрушение простейших конструкций при динамических и импульсных нагрузках	300
Список литературы	307

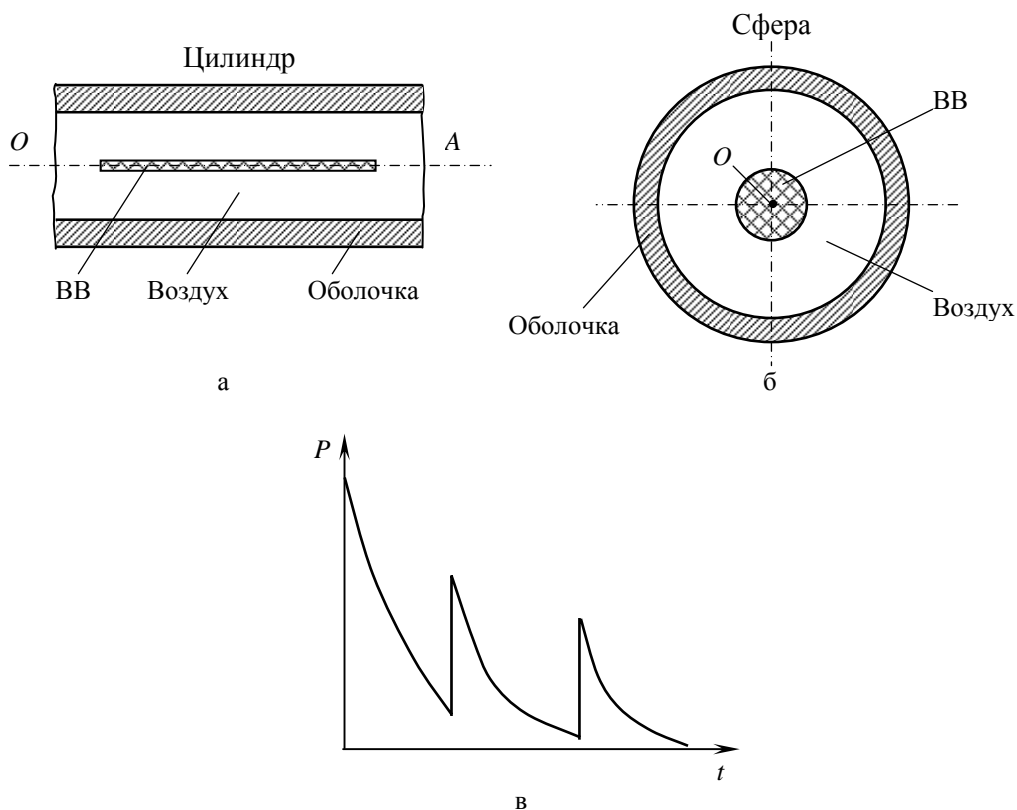


Рис. 6.28

Рассмотрим ряд практически используемых моделей разрушения тонких оболочек при импульсном нагружении, базирующихся на различных предположениях о механизмах деформирования и разрушения. Отметим прежде всего следующее важное обстоятельство. При наличии геометрического подобия и прочих фиксированных условий нагружения (одинаковые ВВ и материал сферической оболочки и его свойства, начальное давление воздуха в оболочке) справедливы зависимости $m_{\text{оск}} \sim M_{\text{об}} \sim r_{\text{об}}^3$, $N = M_{\text{об}}/m_{\text{оск}}$, где $m_{\text{оск}}$ – средняя масса осколка; $M_{\text{об}}$ – масса оболочки; $r_{\text{об}}$ – радиус оболочки; N – число осколков. Таким образом, средняя масса осколка пропорциональна кубу радиуса (или диаметра), а число осколков является постоянной величиной. Многочисленные экспериментальные данные (см., например, [13] и ссылки в этой работе) показывают, однако, что имеет место существенное отклонение от геометрического подобия, а именно: число осколков N не является постоянной величиной, а их средняя масса пропорциональна не кубу радиуса оболочки, а меньшему показателю.

тельно степени. Предположение о тонкости оболочки означает, что $h/r \ll 1$, где h – толщина оболочки, постоянная величина.

Будем далее считать, что:

а) воздействие взрыва на оболочку моделируется давлением $P(t)$ (см. рис. 6.27в), действующим на внутреннюю поверхность оболочки, зависящим от времени t и равномерно распределенным по упомянутой поверхности;

б) теплообмен между различными средами отсутствует;

в) характерное время действия нагрузки $\tau \gg h/C_0$, где C_0 – скорость звука в материале оболочки;

г) процесс деформирования материала оболочки адиабатический.

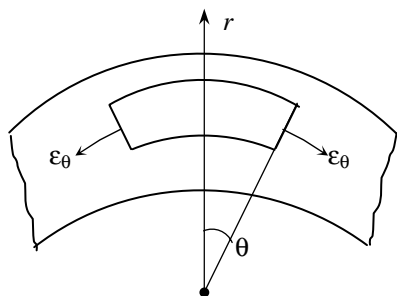
В силу допущений тонкости оболочки и равномерности распределения давления по внутренней поверхности оболочки задача ее деформирования может рассматриваться как одномерная цилиндрическая или одномерная сферическая. В силу тонкости оболочки и условия $\tau \gg h/C_0$ в ней не возникает радиальных напряжений, т. е. отсутствует причина возникновения откольных разрушений.

Напряженно-деформированное состояние материала цилиндрической тонкой оболочки в системе координат, связанной с главными осями r, θ, z , описывается соотношениями:

$$\begin{aligned} \sigma_\theta &= \sigma_0 + S_\theta, \quad \sigma_r = \sigma_0 + S_r = 0, \quad \sigma_z = \sigma_0 + S_z, \\ S_\theta + S_r + S_z &= 0; \\ \varepsilon_\theta &= \varepsilon_\theta^p + \varepsilon_\theta^e, \quad \varepsilon_r = \varepsilon_r^e + \varepsilon_r^p = 0, \quad \varepsilon_z = \varepsilon_z^e + \varepsilon_z^p = 0, \\ \varepsilon_\theta^p + \varepsilon_r^p + \varepsilon_z^p &= 0; \\ \dot{\varepsilon}_\theta &= \dot{\varepsilon}_\theta^e + \dot{\varepsilon}_\theta^p, \quad \dot{\varepsilon}_r = \dot{\varepsilon}_r^e + \dot{\varepsilon}_r^p = 0, \quad \dot{\varepsilon}_z = \dot{\varepsilon}_z^e + \dot{\varepsilon}_z^p = 0, \\ \dot{\varepsilon}_\theta^p + \dot{\varepsilon}_r^p + \dot{\varepsilon}_z^p &= 0. \end{aligned} \quad (6.66)$$

В формулах (6.66) индекс «e» означает упругую составляющую соответствующих компонент тензоров деформаций ε_{ij} и скоростей деформаций $\dot{\varepsilon}_{ij}$, индекс «p» – пластическую компоненту.

Таким образом, в цилиндрическом случае имеет место только кольцевая деформация $\varepsilon_\theta = \frac{u}{r}$, как показано на рис. 6.29, а деформации в направлении оси цилиндра (ε_z) и по его радиусу (ε_r) отсутствуют.



Ось z перпендикулярна плоскости рисунка

Рис. 6.29

В системе главных осей напряженно-деформированное состояние тонкой сферической оболочки описывается соотношениями:

$$\sigma_\theta = \sigma_0 + S_\theta, \quad \sigma_\varphi = \sigma_\theta, \quad \sigma_r = \sigma_0 + S_r = 0, \quad 2S_\theta + S_r = 0;$$

$$\varepsilon_\theta = \varepsilon_\theta^e + \varepsilon_\theta^p, \quad \varepsilon_\varphi = \varepsilon_\theta, \quad \varepsilon_r = \varepsilon_r^e + \varepsilon_r^p = 0, \quad 2\varepsilon_\theta^p + \varepsilon_r^p = 0;$$

$$\dot{\varepsilon}_\theta = \dot{\varepsilon}_\theta^e + \dot{\varepsilon}_\theta^p, \quad \dot{\varepsilon}_\varphi = \dot{\varepsilon}_\theta, \quad \dot{\varepsilon}_r = \dot{\varepsilon}_r^e + \dot{\varepsilon}_r^p = 0, \quad 2\dot{\varepsilon}_\theta^p + \dot{\varepsilon}_r^p = 0.$$

В сферическом случае, как следует из этих соотношений, равны нулю радиальные компоненты напряжения, деформации и скорости деформации.

Связь между компонентами тензоров напряжений, деформаций и скоростей деформаций задается определяющим уравнением.

Список литературы

1. Качанов Л. М. Основы теории пластичности. Изд. 2-е, переработанное и дополненное. М.: Наука, 1969.
2. Седов Л. И. Механика сплошной среды. М.: Наука, 1976. Т. 1, 2.
3. Зельдович Я. Б., Райзер Ю. П. Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений. М: Физматгиз. 1963.
4. Копышев В. П. Теория уравнений состояния. Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2009.
5. Седов Л. И. Методы подобия и размерности в механике. М.: Наука, 1967.
6. Глушак Б. Л. Физика взрыва. Сборник задач и упражнений с решениями. Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2008.
7. Станюкович К. П. Неустановившиеся движения сплошной среды. М.: Наука, 1971.
8. Взрывчатые вещества. Том I. Поведение твердых взрывчатых веществ при механических нагрузках. Учебное пособие в трех томах / Под общей ред. Р. И. Ильяева. Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ. 2001.
9. Зельдович Я. Б. Теория горения и детонации газов. М.-Л.: Изд-во АН СССР, 1944.
10. Физика взрыва / Под ред. Л. П. Орленко. Изд. 3-е, переработанное. В двух томах. М.: Физматлит, 2002.
11. Канель Г. И., Разоренов С. В., Уткин А. В., Фортов В. Е. Ударно-волновые явления в конденсированных средах. М.: Янус-К, 1996.
12. Методы исследования свойств материалов при интенсивных динамических нагрузках / Под ред. М. В. Жерноклетова. Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2003.
13. Разрушение разномасштабных объектов при взрыве / Под ред. А. Г. Иванова. Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2001.
14. Иванов А. Г. Откол в квазиакустическом приближении // ФГВ. 1975. № 3. С. 475–480.
15. Grady D. The spall strength of condensed matter // J. Mech. Phys. Solids. 1988. Vol. 36, N 3. P. 353–384.
16. Глушак Б. Л., Трунин И. Р., Новиков С. А., Рузанов А. И. Численное моделирование откольного разрушения металлов // Фракталы в прикладной физике / Под ред. А. Е. Дубинова. Арзамас-16: ВНИИЭФ. 1995. С. 59–122.
17. Seaman L., Curran D., Shockey A. Computational models for ductile and brittle fracture // J. Appl. Phys. 1976. Vol. 47, N 11. P. 4814–4826.
18. Романченко В. И., Степанов Г. В. Зависимость критических напряжений от временных параметров нагрузки при отколе в меди, алюминии и стали // ПМТФ. 1980. № 4. С. 141–147.
19. Черепанов Г. П. Механика хрупкого разрушения. М.: Наука, 1974.
20. Работнов Ю. Н. Механика деформируемого твердого тела. М.: Наука, 1979.

Учебное издание

Глушак Борис Леонидович
Начала физики взрыва

Редактор *Л. В. Мазан*
Компьютерная подготовка оригинала-макета *С. Н. Фролова*

Подписано в печать 20.12.2011 Формат 70×100/16
Печать офсетная Усл. печ. л. 25 Уч.-изд. л. 19
Тираж 500 экз. Заказ 1048-2011

Отпечатано в Издательско-полиграфическом комплексе
ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ»
607188, г. Саров Нижегородской обл.