

УДК 539.63

К. К. Маевский

Институт гидродинамики им. М. А. Лаврентьева СО РАН  
пр. Акад. Лаврентьева, 15, Новосибирск, 630090, Россия

Новосибирский государственный университет  
ул. Пирогова, 2, Новосибирск, 630090, Россия

E-mail: konstantinm@hydro.nsc.ru

**РАСЧЕТ ИЗЭНТРОП РАЗГРУЗКИ И ДВОЙНОГО СЖАТИЯ  
СПЛОШНЫХ И ПОРИСТЫХ МАТЕРИАЛОВ ПРОСТОЙ МОДЕЛЬЮ  
С ФУНКЦИЕЙ ГРЮНАЙЗЕНА, ЗАВИСЯЩЕЙ ОТ ТЕМПЕРАТУРЫ \***

В работе представлено дальнейшее развитие предложенной ранее автором модели, учитывающей зависимость коэффициента Грюнайзена в явном виде только от температуры. Выполнены расчеты двойного сжатия и изэнтропической разгрузки как сплошных, так и пористых материалов. Проведено сравнение результатов расчетов с известными экспериментальными результатами разных авторов для меди, магния, алюминия и цинка. Показано, что расчет дает хорошее согласие с экспериментом для сплошных и пористых материалов для всех известных автору экспериментальных данных.

*Ключевые слова:* ударная адиабата, изэнтропическая разгрузка, двойное сжатие, пористые материалы, смеси, коэффициент Грюнайзена.

Для описания поведения порошковых смесей, представляющих интерес для многих задач современной науки, а также для решения прикладных задач, желательно иметь достаточно простую модель, дающую при этом хорошее соответствие эксперименту в широком диапазоне давлений как для сплошных, так и для пористых материалов. Несмотря на большое число подходов к выбору уравнения состояния (УС) твердого тела при динамических нагрузках [1–4], проблема расчета УС в ее точной математической постановке практически неразрешима, так как исходные уравнения (из статической термодинамики) чрезвычайно сложны. Поэтому на практике проводят многочисленные упрощения. Парадоксально, но в теории УС легче написать сложное уравнение, чем найти эффективное упрощение, т. е. такое, которое отражает главные черты реальности [4]. Таким образом, главным критерием применимости модельного УС является соответствие его эксперименту.

Для УС типа Ми – Грюнайзена характерны простота и совершенство, чем и объясняется его широкое распространение, при этом выбор параметра (коэффициента) Грюнайзена может быть произведен несколькими путями [5]. В данной работе представлены результаты по дальнейшей апробации предложенной в [6] модели расчета ударно-волнового нагружения пористых сред. Модель основана на предположении, что все компоненты смеси при ударно-волновом нагружении, включая газ в порах, находятся в термодинамическом равновесии. Для описания поведения конденсированных фаз используются УС типа Ми – Грюнайзена. При достаточно невысоких сжатиях теплоемкость  $c_v$  можно считать постоянной и равной значению при нормальных условиях [2].

Уравнения, определяющие состояние конденсированных фаз смеси, записываются в виде  $P(\rho, T) = P_x + P_T$  и  $E(\rho, T) = E_x + E_T$ . Холодная составляющая давления описыва-

\* Работа выполнена при частичной поддержке Междисциплинарного интеграционного проекта СО РАН № 32. Автор выражает благодарность и искреннюю признательность за критические замечания и обсуждение профессору С. А. Кинеловскому.

ется уравнением типа уравнения Тэта. Тогда УС с текущей и начальной плотностью  $\rho_i, \rho_{i0}$  имеет вид

$$P = A \cdot \left( (\rho / \rho_0)^n - 1 \right) + \Gamma \cdot c_v \cdot (T - T_0) \cdot \rho.$$

Простота и удобство использования этого уравнения обусловили его широкую популярность [7], поскольку помимо  $\Gamma$  либо взаимосвязанной с ним величины предельного сжатия  $h = 1 + 2/\Gamma$ , оно содержит только две подгоночных константы  $A$  и  $n$  [4]. В [6] получены зависимости типа  $P(U)$  или  $D(U)$  ( $P, U, D$  – давление, массовая и волновая скорости соответственно), которые можно трактовать как УА многокомпонентной смеси. В [8] был предложен следующий вид коэффициента Грюнайзена, в явном виде зависящий только температуры:

$$\Gamma(T) = \frac{1}{\frac{1}{\Gamma(T_0) - \Gamma(T_\infty)} + C \cdot T} + \Gamma(T_\infty).$$

Параметры  $C$  и  $\Gamma(T_\infty)$  выбираются из условия соответствия расчетных УА известным экспериментальным результатам для каждого материала. При начальной температуре  $T = T_0$  берется  $\Gamma(T_0)$  на основании известных данных при нормальных условиях, промежуточное значение  $\Gamma(T_*)$  и асимптотическое значение  $\Gamma(T_\infty)$  позволяют описывать экспериментальные точки при средних и максимальных сжатиях материала. Данный вид функции Грюнайзена позволил расширить диапазон достоверного описания УА как сплошных, так и пористых веществ [8].

Для получения информации о термодинамических свойствах веществ в интервале плотностей, превышающих плотность однократного сжатия, разработаны способы регистрации состояний, возникающих при повторном ударном сжатии [9]. Рассмотрим, как предложенная модель УС описывает результаты по двойному сжатию вещества. На рис. 1 показан пунктиром расчет двойного сжатия для меди, который близок в диапазоне от 300 до 500 ГПа к зеркальному отражению УА, использованному в [10]. При давлении в 1 ТПа отличие расчетов достигает уже 5%. При начальной точке на УА 331,5 ГПа получаем описание точки двойного сжатия с точностью не меньшей, чем в источнике – 3% по давлению и 2,5% по скорости.

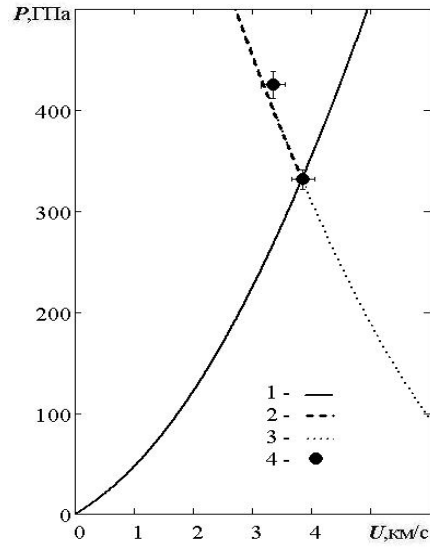


Рис. 1. УА и адиабата двукратного сжатия меди: 1 – УА; 2 – двойное сжатие (практически совпадает с зеркальным отражением); 3 – зеркальное отражение; 4 – данные [10]

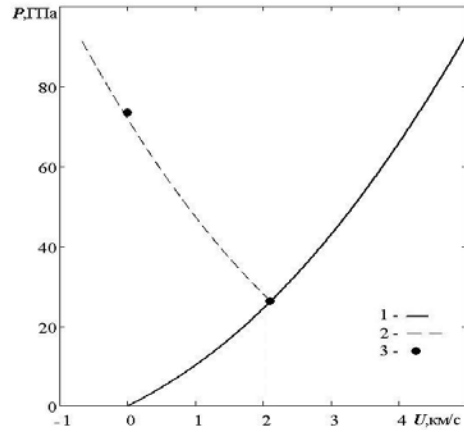


Рис. 2. УА и адиабата двукратного сжатия магния: 1 – УА; 2 – двукратное сжатие; 3 – данные [11]

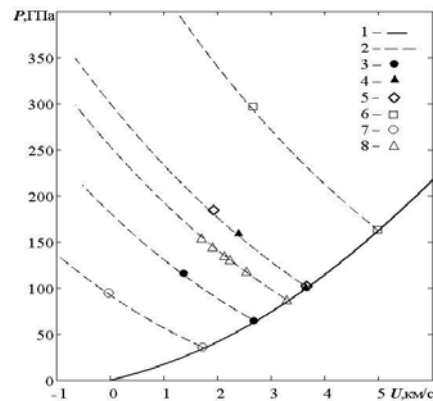


Рис. 3. УА и адиабата двукратного сжатия алюминия: 1 – УА; 2 – двукратное сжатие; 3–6 – данные [10]; 7 – [11]; 8 – [12]

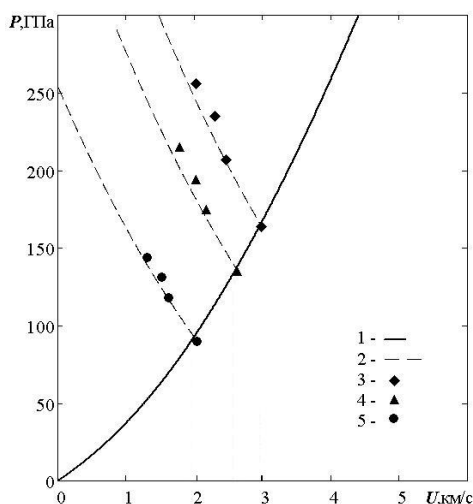


Рис. 4. УА и адиабаты двукратного сжатия цинка: 1 – УА; 2 – двукратное сжатие; 3–4 данные [15]

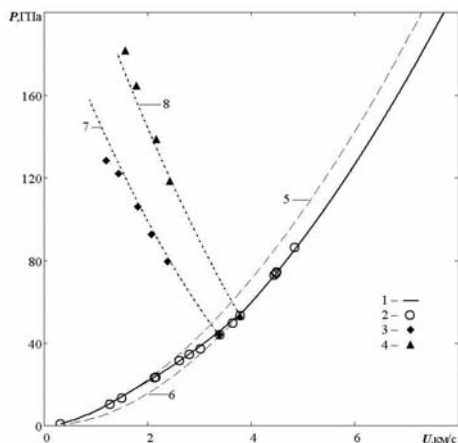


Рис. 5. УА и адиабата двукратного сжатия пористого графита, пористость 0,826: 1 – УА; 2–4 – данные [12]; 5 – УА графита; 6 – УА алмаза; 7–8 – двойное сжатие

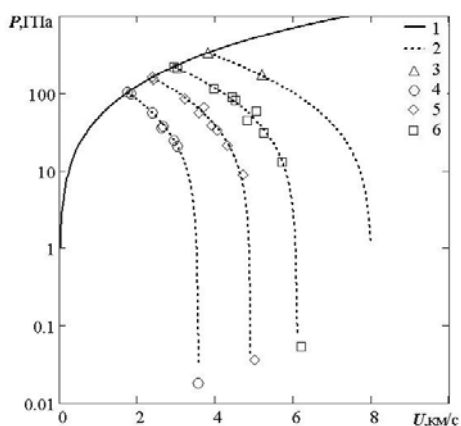


Рис. 6. УА и кривые расширения сплошной меди: 1 – ударная адиабата; 2 – изэнтропы разгрузки; 3 – разгрузка из точки на УА с давлением 329,8 ГПа [10]; 4–6 – разгрузка из точки на УА с давлением 102,0; 159,8; 219,1 ГПа [18] соответственно

Аналогичные расчеты проведены для магния по двойному сжатию, начальная точка по давлению 26,2 ГПа (рис. 2) и для алюминия из начальных точек с давлением 36, 65, 102 и 163 ГПа (рис. 3). Показано хорошее соответствие расчетов эксперименту.

Теперь перейдем к цинку, который позволяет не только проверить достоверность рассматриваемой модели при расчетах по двойному сжатию, но и сравнить с расчетами А. Б. Медведева [13] и А. Т. Сапожникова [14], приведенными в [15], где расчеты по цинку проводятся для апробации различных моделей. Как видно из приведенных на рис. 4 расчетов, предложенная в [6; 8] модель УС позволяет описать экспериментальные данные по двойному сжатию цинка с достоверностью, близкой к описанию широкодиапазонными моделями, использующими существенно большее число подгруппочных параметров.

Расчеты, проведенные для пористого графита, показали возможность адекватного описания двойного сжатия как пористых материалов, так и смесей. На рис. 5 приведен расчет УА и двойного сжатия для графита с пористостью 0,826. Экспериментальные точки на УА до давления 20 ГПа совпадают с расчетом по графиту (пунктирная линия 5), а при давлениях выше 50 ГПа оказываются уже на УА, соответствующей алмазу той же плотности (линия 6). Диапазон 20–50 ГПа соответствует фазовому переходу, где имеются одновременно графит и алмаз. Таким образом, при расчете двойного сжатия из точки с давлением 44 ГПа (линия 7), необходимо рассматривать сжатие смеси графита с алмазом, при этом объемные доли веществ определяется из соответствия эксперименту. При двойном сжатии из точки с давлением 53,3 ГПа расчет проводится для пористого алмаза (линия 8).

Техника мощных ударных волн позволяет получить высокие давления и температуры в сжатом веществе, в то время как область понижения плотностей со стороны конденсированных состояний оказывается недоступной для этих методов исследования. Для продвижения в эту область используется метод адиабатического расширения [16]. Рассмотрим, как предложенная модель описывает изэнтропы разгрузки. Система уравнений, описывающая изменение термодинамических величин вдоль изэнтропы, включает уравнение изэнтропы  $dE = -PdV$

и УС. Уравнение изотропы, проходящей через точку  $P_1, P_{1T}, \sigma_1$  на ударной адиабате, где  $\sigma$  – отношение плотностей, имеет следующий вид [9]:

$$P = P_x + P_{1T} \cdot \left( \frac{\rho}{\rho_0} \right)^{\Gamma+1}. \quad (1)$$

Приращение массовой скорости  $\Delta u$  при изэнтропическом расширении из начального состояния  $P_1, \sigma_1, u_1$  до давления  $P$  равно

$$\Delta u = \int_{P_1}^P \sqrt{-dPdV},$$

где давление берется вдоль изэнтропы по формуле (1). Полная скорость частиц предварительно сжатого ударной волной вещества  $u = u_1 + \Delta u$ .

Расчеты и экспериментальные данные для сплошной меди приведены на рис. 6. Сплошной линией показана УА, пунктиром – изэнтропы из соответствующих начальных точек. Видна хорошая достоверность описания экспериментов, при этом расчет при низких давлениях не занижает скорости в отличие от расчетов по этим данным, приведенным в [17], где расчетная разгрузочная кривая практически совпадает с зеркальным отражением ударной адиабаты.

Для определения возможности применения рассматриваемой модели УС при низких давлениях разгрузки, что является необходимым при расчете остаточного сжатия материала после динамической нагрузки, сравним расчет с данными полученными Бакановой и др. [19]. Аналогично предыдущему, на рис. 7. сплошная линия – расчет УА, пунктир – изэнтропы. Расчет показал хорошее соответствие экспериментальным данным при разгрузках до давлений меньше 0,1 ГПа. По алюминию расчет так же совпадает с экспериментом до низких давлений (рис. 8). При начале разгрузки с давлений более 100 ГПа расчетная скорость несколько занижается, в этой области уже необходимо учитывать испарение металла.

Расчеты по пористым образцам приведены на рис. 9, 10. На рис. 9 показан расчет по углероду (графит) с пористостью (отношение плотности пористого материала к плотности сплошного) 0,941. На рис. 10 приведен расчет по никелю с пористостью 0,434 и отражены экспериментальные данные как на УА, так и на изэнтропах разгрузки. Все точки описываются с хорошей достоверностью, за исключением последней точки

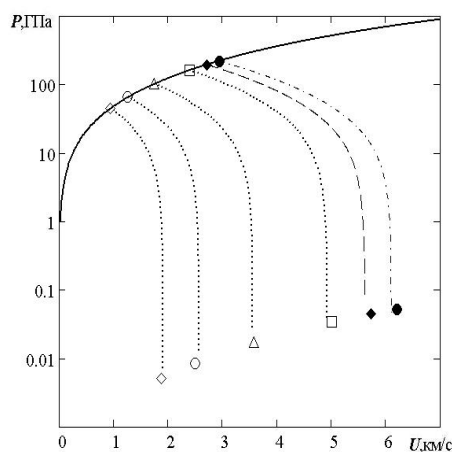


Рис. 7. УА и кривые расширения сплошной меди. Разгрузка из точки на УА с давлением 1 – 45 ГПа, 2 – 66 ГПа, 3 – 102 ГПа, 4 – 161 ГПа, 5 – 194 ГПа, 6 – 219 ГПа [19]

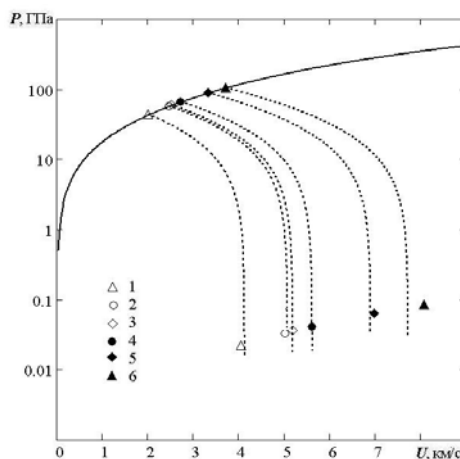


Рис. 8. УА и кривые расширения сплошного алюминия. Разгрузка из точки на УА с давлением 1 – 44 ГПа; 2 – 58 ГПа; 3 – 60 ГПа; 4 – 67 ГПа; 5 – 89 ГПа; 6 – 105 ГПа [19]

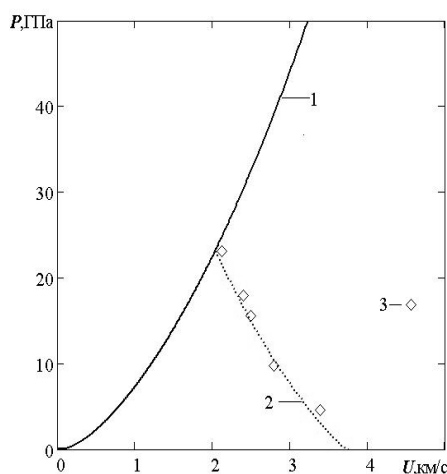


Рис. 9. УА и кривые расширения пористого углерода, пористость 0,941: 1 – ударная адиабата; 2 – изэнтропы разгрузки; 3 – данные [12]

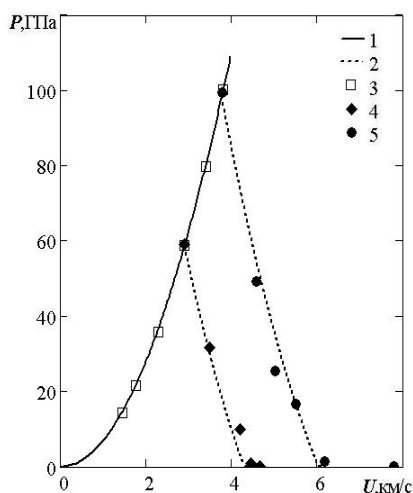


Рис. 10. УА и кривые расширения пористого никеля, пористость 0,434: 1 – ударная адиабата; 2 – изэнтропы разгрузки; 3 – данные на УА [20]; 4 – расширение, начальные точки 59,0 и 99,4 ГПа [21]

по никелю с начальным давлением 99,5 ГПа. Для описания этой точки необходимо учитывать испарение.

Как было показано, предложенная в [6; 8] модель УС дает хорошую достоверность при описании сжатия двойными ударными волнами. При описании изотермических разгрузок как сплошных, так и пористых образцов до области испарения, которая характеризуется существенным приращением массовой скорости [21], получено также хорошее соответствие. Таким образом, подтверждена возможность использования данной модели для расчета параметров разгрузки пористых материалов, в частности остаточного сжатия, а с учетом простоты модели аналогичные расчеты можно провести и для пористых смесей.

### Список литературы

1. Жарков В. К., Калинин В. А. Уравнения состояния твердых тел при высоких давлениях и температурах. М. Наука, 1968.
2. Зельдович Я. Б., Райзер Ю. П. Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений. М.: Наука, 1966.
3. Бушман А. Ф., Фортон В. Е. Модели уравнения состояния вещества // УФН. 1983. Т. 140, вып. 2. С. 177–232.
4. Копышев В. К., Медведев А. Б. Обзор принципиальных идей моделей уравнения состояния во ВНИИЭФ // Высокие плотности энергии. Саров, 1997. С. 271–283.
5. Люшкин Б. А., Герасимов А. В., Крестулева Р. А., Люшкин П. А. Моделирование физико-механических процессов в неоднородных конструкциях. Новосибирск. Изд-во СО РАН, 2001. 272 с.
6. Кинеловский С. А., Маевский К. К., Родиков А. С. Одна модель расчета ударной адиабаты пористой гетерогенной среды // Вестн. Новосиб. гос. ун-та. Серия: Физика. 2008. Т. 3, вып. 1. С. 3–11.
7. Голубев В. К. Определение диапазона применимости для уравнения состояния металлов с постоянным коэффициентом Грюнайзена // Хим. физика. 2002. Т. 21, № 10. С. 30–35.
8. Кинеловский С. А., Маевский К. К. Расчет ударной адиабаты порошковых смесей с учетом зависимости коэффициента Грюнайзена от температуры // Вестн. Новосиб. гос. ун-та. Серия: Физика. 2009. Т. 4, вып. 4. С. 71–78.
9. Методы исследования свойств материалов при интенсивных динамических нагрузках / Под ред. М. И. Жерноклетова. Саров: ФГУП РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2003. 403 с.
10. Nellis W. J., Mitchell A. C., Young D. A. Equation-of-State Measurements for Aluminum, Copper, and Tantalum in the Pressure Range 80–440 GPa (0,8–4,4 Mbar) // J. Appl. Phys. 2003. Vol. 93 (1). P. 304–310.
11. Альтшулер Л. В., Петрунин А. П. Рентгенографическое исследование сжимаемости легких веществ при косом столкновении ударных волн // ЖЭТФ. 1961. Т. 31, вып. 6. С. 717–725.
12. Экспериментальные данные по ударно-волновому сжатию и адиабатическому расширению конденсированных веществ / Под ред. Р. Ф. Трунина. Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2006. С. 531.
13. Медведев А. Б. Модель уравнения состояния с учетом испарения, ионизации и плавления // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Теоретическая и прикладная физика. 1992. Вып. 1. С. 23–29.
14. Сапожников А. Т., Перишина А. В. Полуэмпирическое уравнение состояния металлов в широком диапазоне плотностей и температур // ВАНТ. Серия: Методики и программы численного решения задач математической физики. 1979. Вып. 4 (6). С. 47–56.

15. Трунин Р. Ф., Симаков Г. В. Исследование ударной сжимаемости и изэнтропического расширения цинка // Мат. моделирование. 1993. Т. 5, № 8. С. 108–117.
16. Аврорин Е. Н., Водолага Б. К., Симоненко В. А., Фортон В. Е. Мощные ударные волны и экстремальные состояния вещества. // УФН. 1993. Т. 163, №5. С. 1–34.
17. Надыкто Б. А. Влияние изменения электронной структуры при сжатии на форму кривых разгрузки меди, цинка и алюминия // Хим. физика. 2002. Т. 21, № 10. С. 55–60.
18. Жерноклетов М. В., Зубарев В. Н., Сутулов Ю. Н. Адиабаты пористых образцов и изэнтропы расширения сплошной меди // ЖПМТФ. 1984. № 1. С. 119–123.
19. Баканова А. А., Дудолатов М. В., Жерноклетов М. В., Зубарев В. Н., Симаков Г. В. Об испарении ударно-сжатых металлов при расширении // ПМТФ. 1983. № 2. С. 76–81.
20. Трунин Р. Ф., Симаков Г. В., Сутулов Ю. Н., Медведев А. Б., Rogozkin Б. Д., Федотов Ю. Е. Сжимаемость пористых металлов в ударных волнах // ЖЭТФ. 1989. Т. 96, № 3 (9). С. 1024–1038.
21. Гударенко Л. Ф., Гущина О. Н., Жерноклетов М. В., Медведев А. Б., Симаков Г. В. Ударное сжатие и изэнтропическое расширение пористых образцов вольфрама, никеля и олова // ТВТ. 2000. Т. 38, № 3. С. 437–444.

Материал поступил в редколлегию 29.12.2009

К. К. Maevskii

**CALCULATION OF ISENTROPICS OF UNLOADING  
AND DOUBLE COMPRESSION OF CONTINUOUS AND POROUS MATERIALS BY SIMPLE MODEL  
WITH FUNCTION OF GRUNAYZENA DEPENDING ON TEMPERATURE**

The offered is in-process approved before by author model, taking into account dependence of coefficient of Mie-Grüneisen in an obvious kind only from a temperature. The calculations of double compression and unloading of both continuous and porous materials are produced. Comparing of results of calculations is conducted to the known experimental results of different authors for a copper, magnesium, aluminium and zinc. It is rotined that a calculation gives a good consent with an experiment both for continuous and for porous materials for the experimental information known to the author.

*Keywords:* shock adiabatic, unloading isentropic, double compression, porous materials, powders, coefficient of Mie-Grüneisen.