

Экспериментальное и теоретическое исследование термодинамических свойств оксида бериллия при высоких давлениях в волнах ударного сжатия

К. В. Хищенко^{1,2,3,4,*}, **К. К. Крупников⁵**, **Н. Ю. Жугин⁵**,
А. Ю. Николаев⁵, **Е. Б. Смирнов^{5,4}**, **Д. В. Петров⁵**

¹Объединенный институт высоких температур РАН, Москва, Россия

²Московский физико-технический институт, Долгопрудный

³Федеральный исследовательский центр проблем химической физики и
медицинской химии РАН, Черноголовка

⁴Южно-Уральский государственный университет, Челябинск

⁵Всероссийский научно-исследовательский институт технической физики
имени академика Е.И. Забабахина, Снежинск, Россия

**konst@ihed.ras.ru*

Experimental and theoretical study of the thermodynamic properties of **beryllium oxide** at high pressures in shock compression waves

K. V. Khishchenko^{1,2,3,4,*}, **K. K. Krupnikov**⁵, **N. Yu. Zhugin**⁵,
A. Yu. Nikolaev⁵, **E. B. Smirnov**^{5,4}, **D. V. Petrov**⁵

¹Joint Institute for High Temperatures RAS, Moscow, Russia

²Moscow Institute of Physics and Technology, Dolgoprudny, Russia

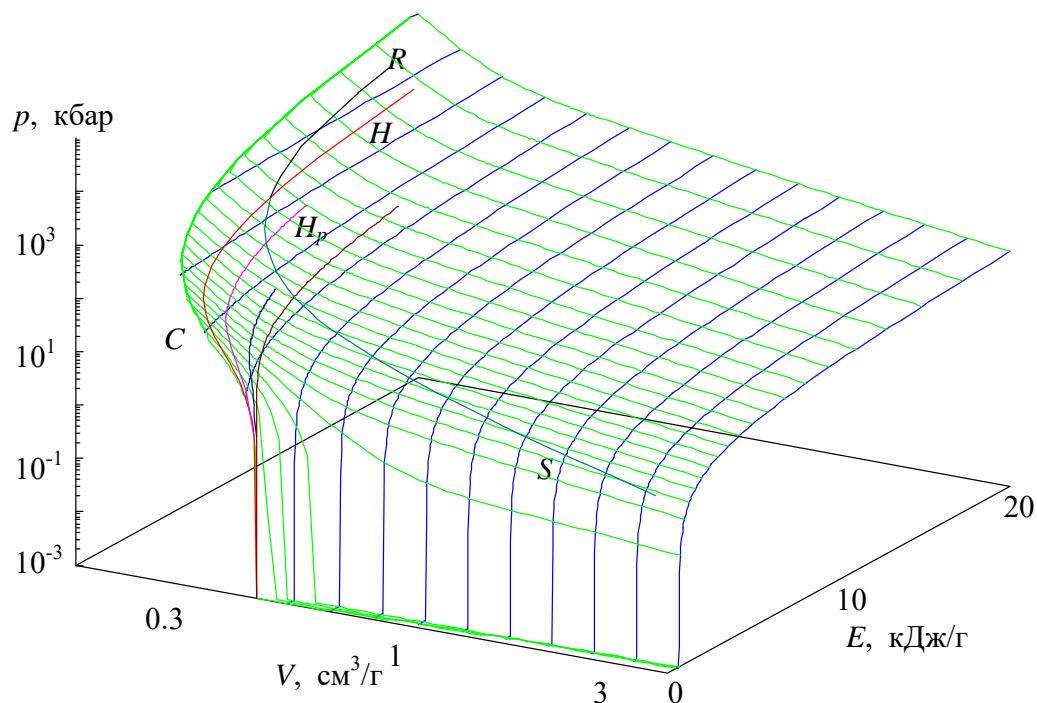
³Federal Research Center of Problems of Chemical Physics and Medicinal Chemistry RAS, Chernogolovka, Russia

⁴South Ural State University, Chelyabinsk, Russia

⁵Academician Zababakhin All-Russian Research Institute of Technical Physics, Snezhinsk, Russia

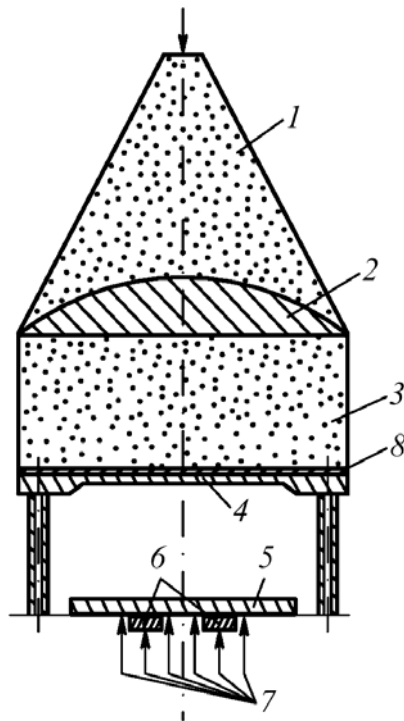
**konst@ihed.ras.ru*

Тефлон. Расчетная поверхность давление–объем–внутренняя энергия



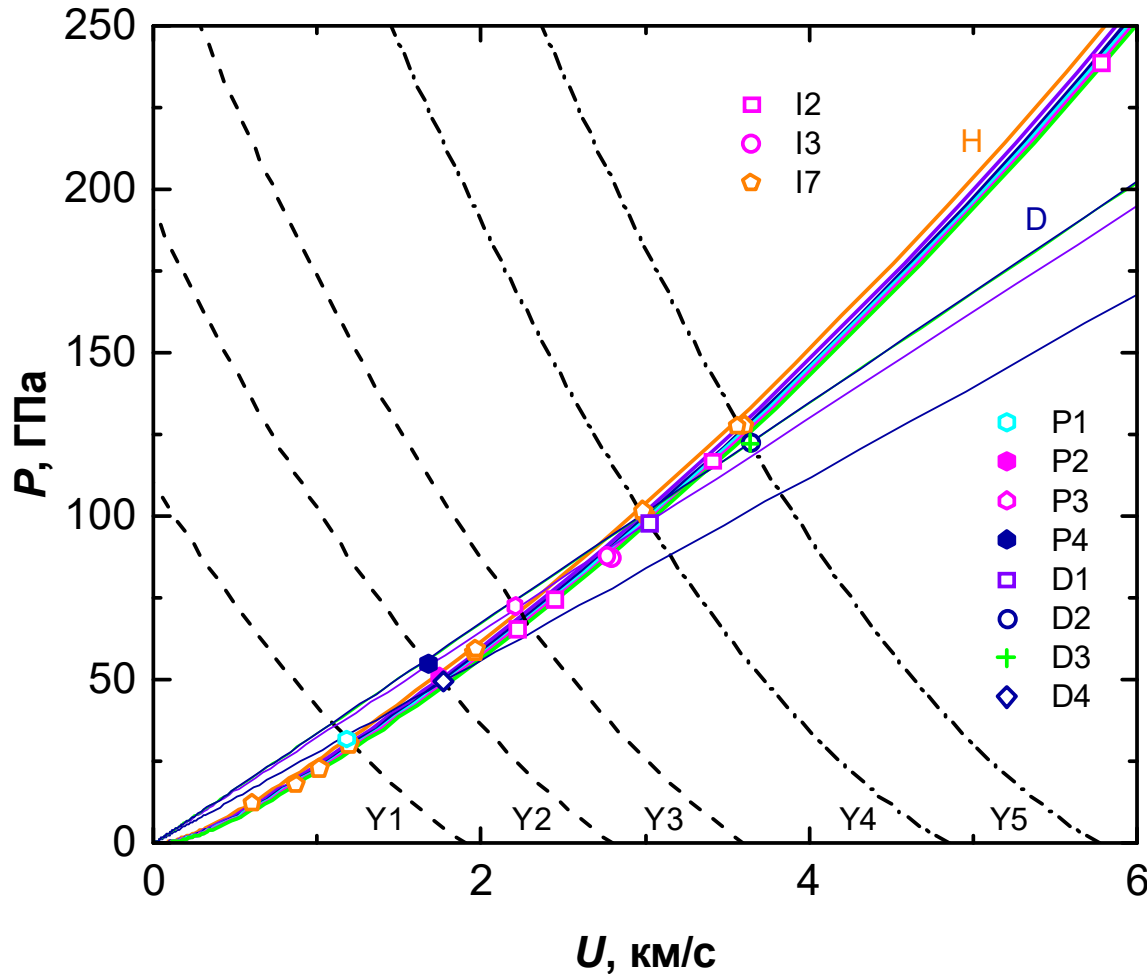
C — кривая упругого сжатия при $T = 0$ К,
 H и H_p — ударные адиабаты сплошных и пористых образцов,
 R — кривая повторного нагружения, S — изоэнтропа расширения

Взрывное измерительное устройство с разгоном ударника до скоростей 5–6 км/с



- 1 — линзовый заряд ВВ,
- 2 — плоскороволновая линза,
- 3 — основной заряд,
- 4 — стальной ударник,
- 5 — экран из эталонного металла,
- 6 — исследуемый образец,
- 7 — электроконтактные датчики,
- 8 — прокладка из плексигласа

Ударные адиабаты образцов оксида бериллия (Н) различной начальной плотности (ρ_{00}) и ударников из стали 12Х18Н10Т (Y1, Y2 и Y3) и стали 10 (Y4 и Y5)



Толстые сплошные линии (Н) – результаты расчетов ударных адиабат образцов с начальной плотностью $\rho_{00} = 2.93, 2.90, 2.88, 2.87, 2.86$ и 2.85 г/см³ (кривые Н сверху вниз) по представленной далее модели. Штриховые линии – ударные адиабаты торможения ударников из нержавеющей стали 12Х18Н10Т для опытов P1 (Y1), P2, P4, D4 (Y2) и P3 (Y3). Штрихпунктирные линии – ударные адиабаты торможения ударников из стали 10 для опытов D1 (Y4), D2 и D3 (Y5). Тонкие сплошные линии (D) – волновые лучи $P = \rho_{00} D_{sp} U$ для опытов D2, D3, D1 и D4 (прямые D сверху вниз). Маркеры – экспериментальные данные для образцов с начальной плотностью $\rho_{00} = 2.86$ (I2 – [1]; I3 – [2]), 2.93 (I7 – эта работа), 2.90 (D1), 2.88 (P4, D2, D4), 2.87 (P1), 2.86 (P2, P3) и 2.85 г/см³ (D3).

[1] Павловский М.Н. Ударная сжимаемость шести высокотвердых веществ // ФТТ. 1970. Т. 12. № 7. С. 2175–2178.

[2] Gust W.H., Royce E.B. Dynamic yield strengths of B₄C, BeO, and Al₂O₃ ceramics // J. Appl. Phys. 1971. V. 42. P. 276–295.

Модель уравнения состояния в калорической форме $E = E(V, P)$ или $P = P(V, E)$

Общий вид

$$P(V, E) = P_c(V) + \frac{\Gamma(V, E)}{V} (E - E_c(V))$$

Упругая компонента (при $T = 0$ К)

$$E_c(V) = \frac{B_{0c} V_{0c}}{m - n} (\sigma_c^m / m - \sigma_c^n / n) + E_d$$

$$\sigma_c = V_{0c} / V$$

при $V = V_{0c}$: $E_c(V_{0c}) = 0$

$$E_d = B_{0c} V_{0c} / mn$$

$$P_c(V_{0c}) = -dE_c/dV = 0$$

$$B_c(V_{0c}) = -VdP_c/dV = B_{0c}$$

$$B'_c(V_{0c}) = dB_c/dP_c = B'_{0c}$$

Модель уравнения состояния в калорической форме $E = E(V, P)$ или $P = P(V, E)$

Общий вид

$$P(V, E) = P_c(V) + \frac{\Gamma(V, E)}{V} (E - E_c(V))$$

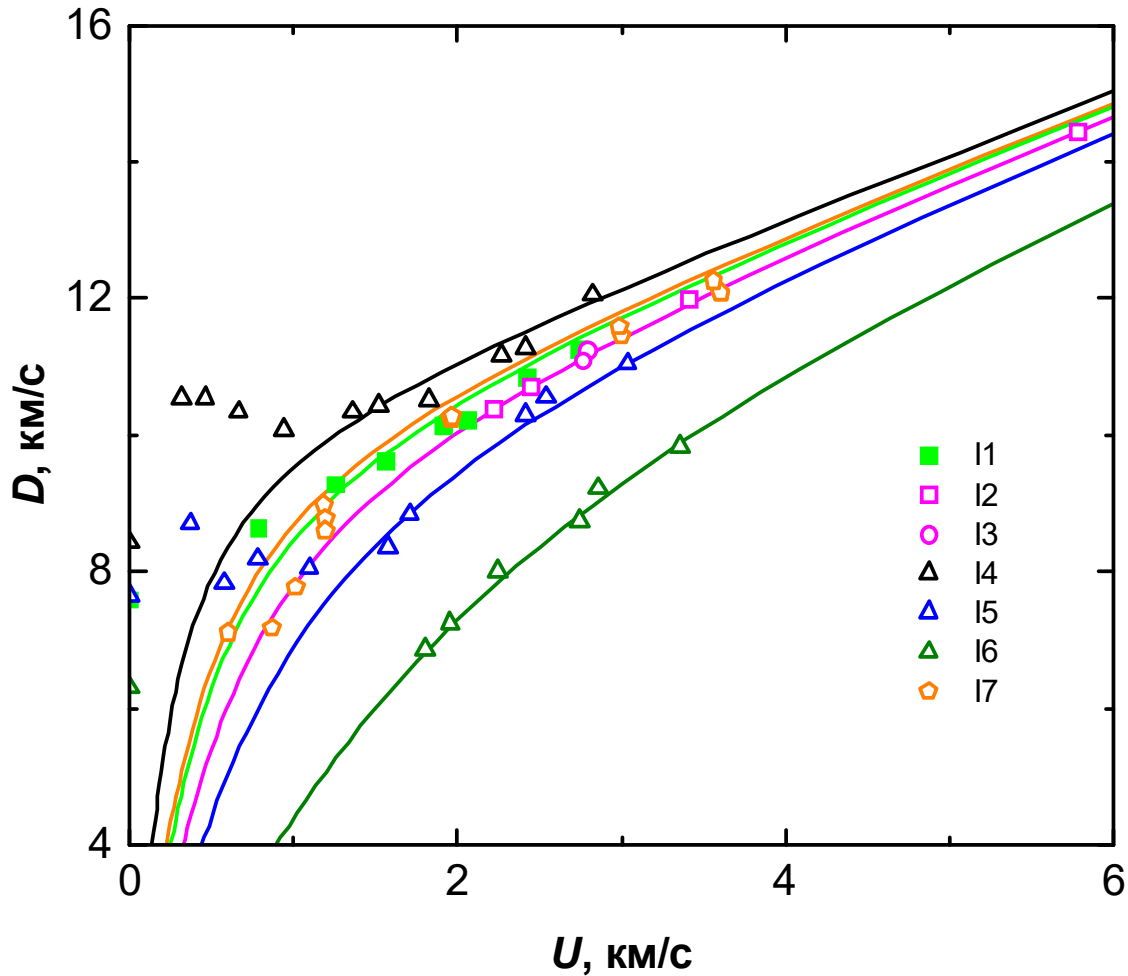
Тепловая компонента

$$\Gamma(V, E) = \gamma_i + \frac{\gamma_c(V) - \gamma_i}{1 + \sigma_c^{-2/3} (E - E_c(V)) / E_a}$$

$$\gamma_c(V) = 2/3 + (\gamma_{0c} - 2/3) \frac{\sigma_n^2 + \ln^2 \sigma_m}{\sigma_n^2 + \ln^2(\sigma / \sigma_m)}$$

$$\sigma = V_0 / V$$

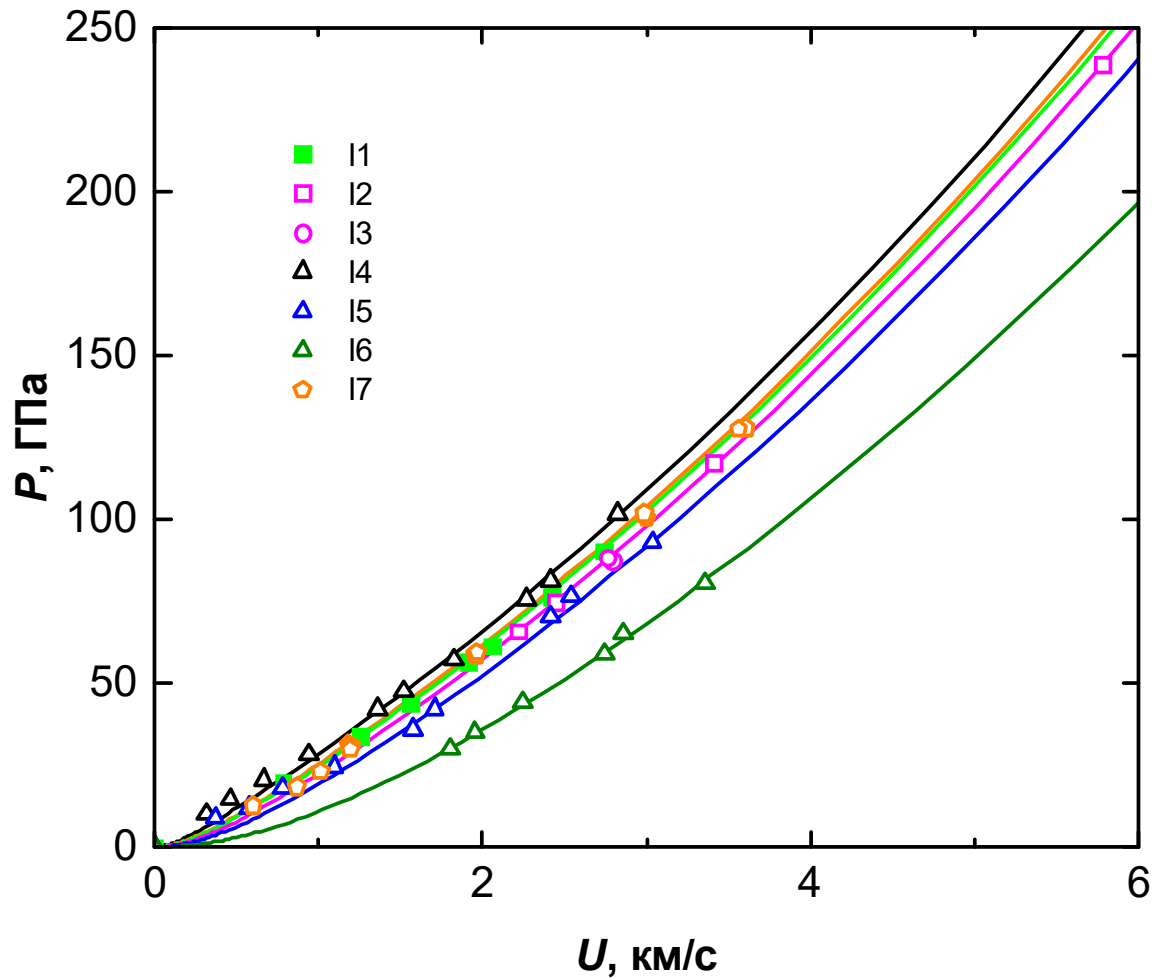
Ударные адиабаты образцов оксида бериллия различной начальной плотности



Сплошные линии – результаты расчетов по уравнению состояния на основе представленной модели для образцов с начальной плотностью $\rho_{00} = 2.989, 2.93, 2.913, 2.86, 2.781$ и 2.451 г/см³ (кривые сверху вниз). Маркеры – экспериментальные данные для образцов с начальной плотностью $\rho_{00} = 2.913$ (I1 – [1]), 2.86 (I2 – [2]; I3 – [3]), 2.989 (I4 – [4]), 2.781 (I5 – [4]), 2.451 (I6 – [4]) и 2.93 г/см³ (I7 – эта работа).

- [1] Cline C.F., Stephens D.R. Volume compressibility of BeO and other II–VI compounds // J. Appl. Phys. 1965. V. 36. P. 2869–2873.
[2] Павловский М.Н. Ударная сжимаемость шести высокотвердых веществ // ФТТ. 1970. Т. 12. № 7. С. 2175–2178.
[3] Gust W.H., Royce E.B. Dynamic yield strengths of B₄C, BeO, and Al₂O₃ ceramics // J. Appl. Phys. 1971. V. 42. P. 276–295.
[4] LASL Shock Hugoniot Data / Ed. Marsh S.P. Berkeley, CA, USA: University of California Press, 1980.

Ударные адиабаты образцов оксида бериллия различной начальной плотности



Сплошные линии – результаты расчетов по уравнению состояния на основе представленной модели для образцов с начальной плотностью $\rho_{00} = 2.989, 2.93, 2.913, 2.86, 2.781$ и 2.451 г/см^3 (кривые сверху вниз). Маркеры – экспериментальные данные для образцов с начальной плотностью $\rho_{00} = 2.913$ (I1 – [1]), 2.86 (I2 – [2]; I3 – [3]), 2.989 (I4 – [4]), 2.781 (I5 – [4]), 2.451 (I6 – [4]) и 2.93 г/см^3 (I7 – эта работа).

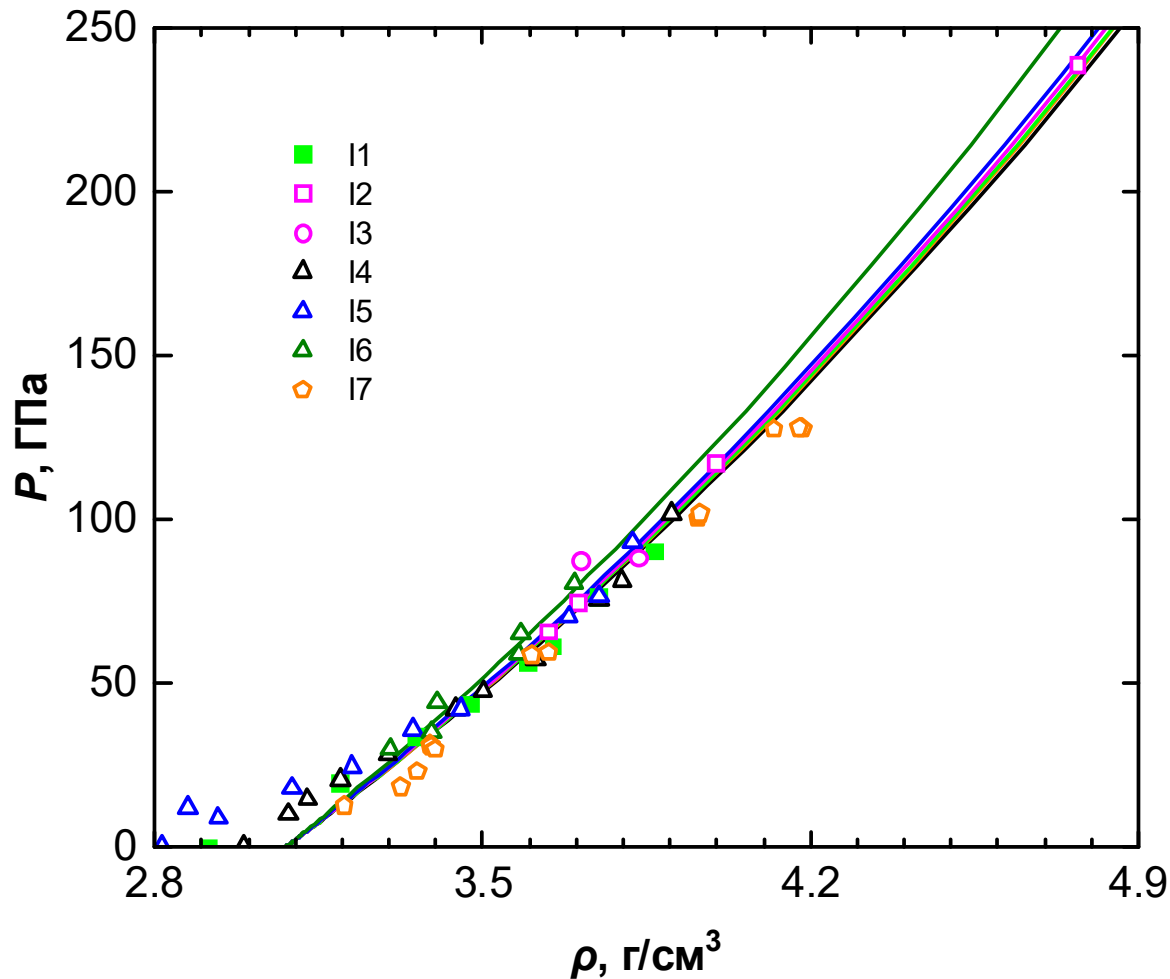
[1] Cline C.F., Stephens D.R. Volume compressibility of BeO and other II–VI compounds // J. Appl. Phys. 1965. V. 36. P. 2869–2873.

[2] Павловский М.Н. Ударная сжимаемость шести высокотвердых веществ // ФТТ. 1970. Т. 12. № 7. С. 2175–2178.

[3] Gust W.H., Royce E.B. Dynamic yield strengths of B_4C , BeO, and Al_2O_3 ceramics // J. Appl. Phys. 1971. V. 42. P. 276–295.

[4] LASL Shock Hugoniot Data / Ed. Marsh S.P. Berkeley, CA, USA: University of California Press, 1980.

Ударные адиабаты образцов оксида бериллия различной начальной плотности



Сплошные линии – результаты расчетов по уравнению состояния на основе представленной модели для образцов с начальной плотностью $\rho_{00} = 2.989, 2.93, 2.913, 2.86, 2.781$ и 2.451 г/см³ (кривые сверху вниз). Маркеры – экспериментальные данные для образцов с начальной плотностью $\rho_{00} = 2.913$ (I1 – [1]), 2.86 (I2 – [2]; I3 – [3]), 2.989 (I4 – [4]), 2.781 (I5 – [4]), 2.451 (I6 – [4]) и 2.93 г/см³ (I7 – эта работа).

[1] Cline C.F., Stephens D.R. Volume compressibility of BeO and other II–VI compounds // J. Appl. Phys. 1965. V. 36. P. 2869–2873.

[2] Павловский М.Н. Ударная сжимаемость шести высокотвердых веществ // ФТТ. 1970. Т. 12. № 7. С. 2175–2178.

[3] Gust W.H., Royce E.B. Dynamic yield strengths of B₄C, BeO, and Al₂O₃ ceramics // J. Appl. Phys. 1971. V. 42. P. 276–295.

[4] LASL Shock Hugoniot Data / Ed. Marsh S.P. Berkeley, CA, USA: University of California Press, 1980.

Выводы

- Экспериментально исследована ударная сжимаемость керамических образцов оксида бериллия в интервале давлений до 130 ГПа.
- Обобщение новых и имевшихся ранее данных по ударной сжимаемости образцов оксида бериллия различной начальной плотности проведено в рамках полуэмпирического уравнения состояния в широком диапазоне давлений и степеней сжатия.
- Полученные данные и новое уравнение состояния могут быть использованы для анализа и численного моделирования процессов при высоких плотностях энергии.

Спасибо