

Забабахинские Научные Чтения 2023

29 мая – 2 июня 2023 г.

Снежинск, Челябинская область, Россия

Моделирование ударной сжимаемости сплавов вольфрам-медь при высоких давлениях и температурах

Середкин Н. Н.^{1,2,3}, Хищенко К. В.^{1,3,4,5}

¹Объединенный институт высоких температур РАН, Москва

²Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва

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

⁴Московский физико-технический институт, Долгопрудный

⁵Южно-Уральский государственный университет, Челябинск

E-mail: nikser76@yandex.ru



Цель работы

- ✓ Построение модели уравнения состояния для различных сплавов с разными массовыми долями и уравнениями состояния компонентов в ударных волнах при высоких давлениях и температурах.

Задачи данной работы

- Построение уравнений состояния для Cu и W в ударных волнах.
- Построение уравнения состояния для сплава W–Cu в ударных волнах на основе уравнений состояния для компонентов сплава.
- Расчет ударных адиабат для сплавов W–Cu с разными массовыми долями компонентов при высоких давлениях и температурах двумя методами: на основе уравнения состояния, а также на основе принципа аддитивности ударных адиабат компонентов.
- Сравнение результатов проведенных расчетов двумя методами друг с другом и с имеющимися данными ударно-волновых экспериментов для сплавов W–Cu при высоких давлениях и температурах.



Принцип аддитивности ударных адиабат

Согласно принципу аддитивности [1] удельный объем ударно-сжатой смеси (V_{1N}) при заданном давлении (P) предполагается равным сумме удельных объемов (V_1, \dots, V_N) ударно-сжатых компонентов этой смеси с учетом их массовых долей ($\alpha_1, \dots, \alpha_N$) при том же давлении (P). Это условие выражается соотношением:

$$V_{1N}(P) = \sum_i^N \alpha_i V_i(P)$$

При заданном давлении (P), получив V_{1N} , находятся массовая и волновая скорости для сплавов:

$$U_{1N}(P) = \sqrt{(P - P_0)(V_{1N0} - V_{1N})}$$
$$D_{1N}(P) = V_{1N0} \sqrt{(P - P_0)/(V_{1N0} - V_{1N})}$$

[1] Alekseev Y. F., Al'tshuler L. V., Krupnikova V. P. Shock compression of two-component paraffin-tungsten mixtures //Journal of AppWed Mechanics and Technical Physics. – 1971. – Т. 76. – №. 4. – С. 624-627.



Модель уравнения состояния STEOS для компонентов сплава W–Cu

Уравнение состояния для Cu и W задается в виде сумм:

$$E(V, T) = E_c(V) + E_a(V, T) + E_e(V, T),$$

$$P(V, T) = P_c(V) + P_a(V, T) + P_e(V, T),$$

где $E_c(V)$ и $P_c(V)$ — упругие составляющие энергии и давления при $T = 0$; $E_a(V, T)$ и $P_a(V, T)$ — тепловой вклад тяжелых частиц (атомов, ионов); $E_e(V, T)$ и $P_e(V, T)$ — тепловой вклад электронов.



Модель уравнения состояния STEOS для компонентов сплава W–Cu

Холодная часть:

$$E_c(V) = \frac{B_{0c}V_{0c}}{mn} \left(\frac{n\zeta^m - m\zeta^n}{m-n} + 1 \right),$$

$$P_c(V) = B_{0c} \left(\frac{\zeta^{m+1} - \zeta^{n+1}}{m-n} \right).$$

Здесь $\zeta = V_{0c}/V$, V — удельный объем вещества, B_{0c} , V_{0c} , m и n — параметры.

Тепловой вклад тяжелых частиц:

$$E_a(V, T) = \frac{3}{2} RT \frac{2\theta^2 + T_a \sigma^{\frac{2}{3}} T}{\theta^2 + T_a \sigma^{\frac{2}{3}} T},$$

$$P_a(V, T) = \frac{1}{V} RT \frac{3\theta^2 \gamma + T_a \sigma^{\frac{2}{3}} T}{\theta^2 + T_a \sigma^{\frac{2}{3}} T}.$$

Здесь $\sigma = V_0/V$, T — температура, R — удельная газовая постоянная, V_0 , T_a , θ , γ , δ_n и σ_m — параметры.

Тепловой вклад электронов:

$$E_e(V, T) = \frac{1}{2} \beta_{e0} \sigma^{-\gamma_{e0}} T^2,$$

$$P_e(V, T) = \frac{\gamma_{e0}}{V} \frac{1}{2} \beta_{e0} \sigma^{-\gamma_{e0}} T^2.$$

Здесь β_{e0} и γ_{e0} — параметры.



Температурное уравнение состояния STEOS для сплава W–Cu

Уравнение состояния для сплава W–Cu задается в виде сумм:

$$V_{1N}(P, T) = \sum_i^N \alpha_i V_i(P, T),$$
$$E_{1N}(P, T) = \sum_i^N \alpha_i E_i(P, T),$$

где V_{1N} – удельный объем ударно-сжатой смеси, V_i – удельный объем i -того компонента, E_{1N} – удельная внутренняя энергия сплава; E_i – удельная внутренняя энергия i -того компонента.



Расчет ударных адиабат смеси

При заданном давлении (P) решается следующая система уравнений:

$$\left\{ \begin{array}{l} V_{1N}(P, T) = \sum_i^N \alpha_i V_i(P, T), \\ E_{1N}(P, T) = \sum_i^N \alpha_i E_i(P, T), \\ E_{1N} = E_0 + \frac{1}{2} (P + P_0)(V_{00} - V_{1N}), \end{array} \right.$$

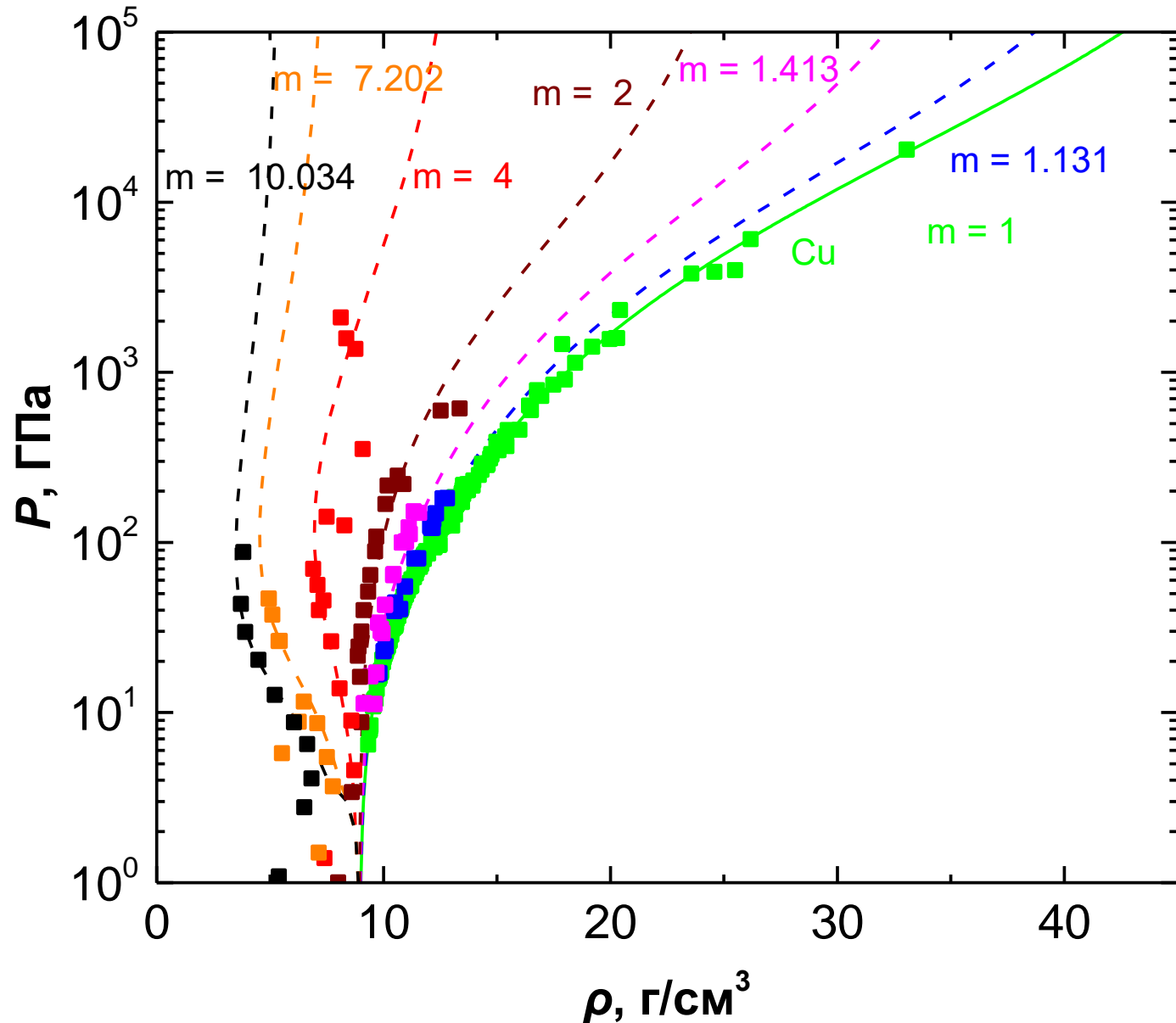
где первые два уравнения – уравнение состояния STEOS смеси, третье – уравнение Гюгонио, V_{1N} – удельный объем ударно-сжатой смеси, V_i – удельный объем i -того компонента, E_{1N} – удельная внутренняя энергия сплава; E_i – удельная внутренняя энергия i -того компонента.

$$\sum_i^N \alpha_i E_i(P, T) = E_0 + \frac{1}{2} (P + P_0)(V_{00} - \sum_i^N \alpha_i V_i(P, T))$$



Ударные адиабаты меди

График зависимости $P(\rho)$

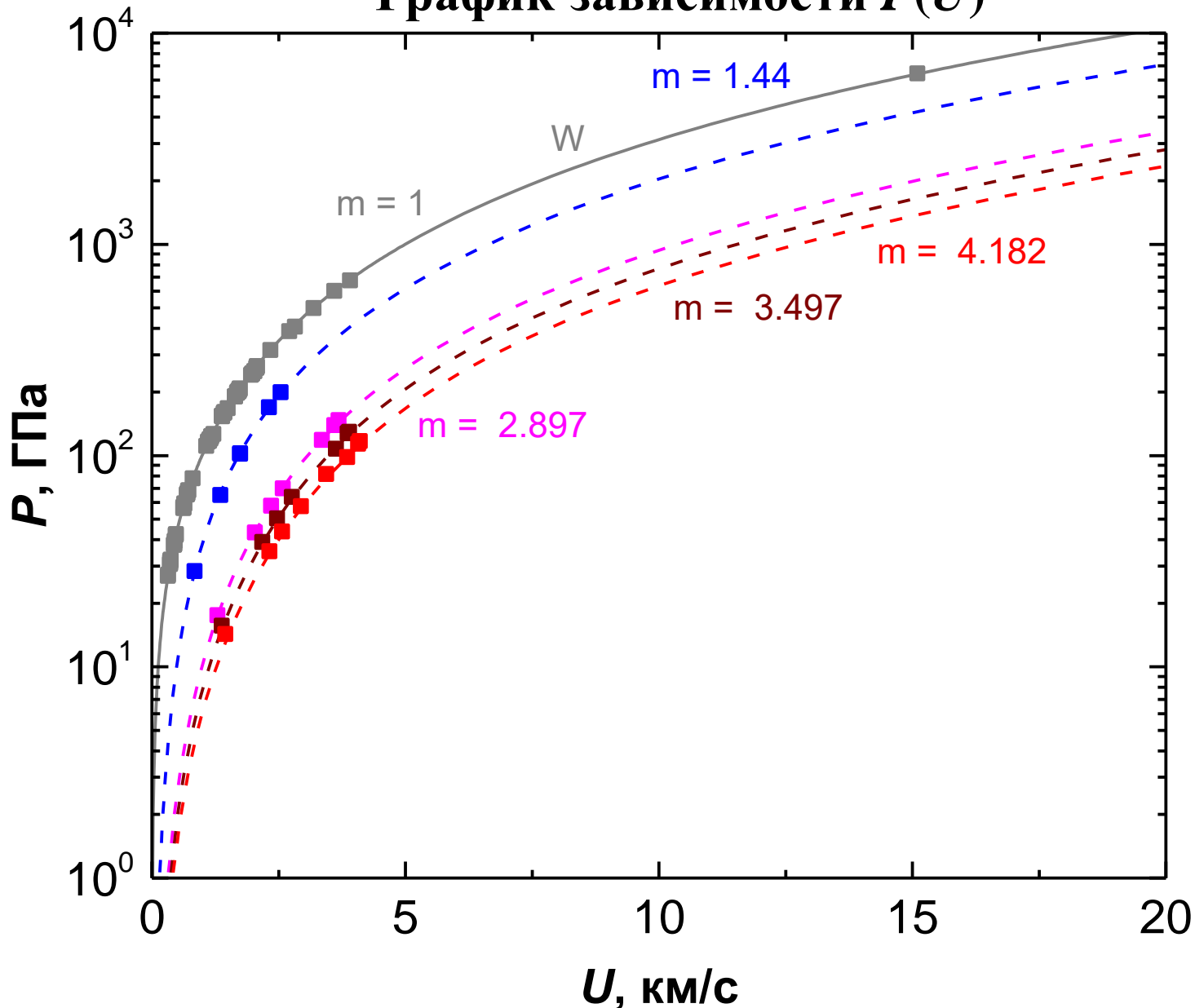


- Зеленая линия – ударная адиабата для сплошного материала, $m = 1$;
- Синяя линия – ударная адиабата для меди с $m = 1.131$;
- Розовая линия – ударная адиабата для меди с $m = 1.413$;
- Коричневая линия – ударная адиабата для меди с $m = 2$;
- Красная линия – ударная адиабата для меди с $m = 4$;
- Оранжевая линия – ударная адиабата для меди с $m = 7.202$;
- Черная линия – ударная адиабата для меди с $m = 10.034$;



Ударные адиабаты вольфрама

График зависимости $P(U)$

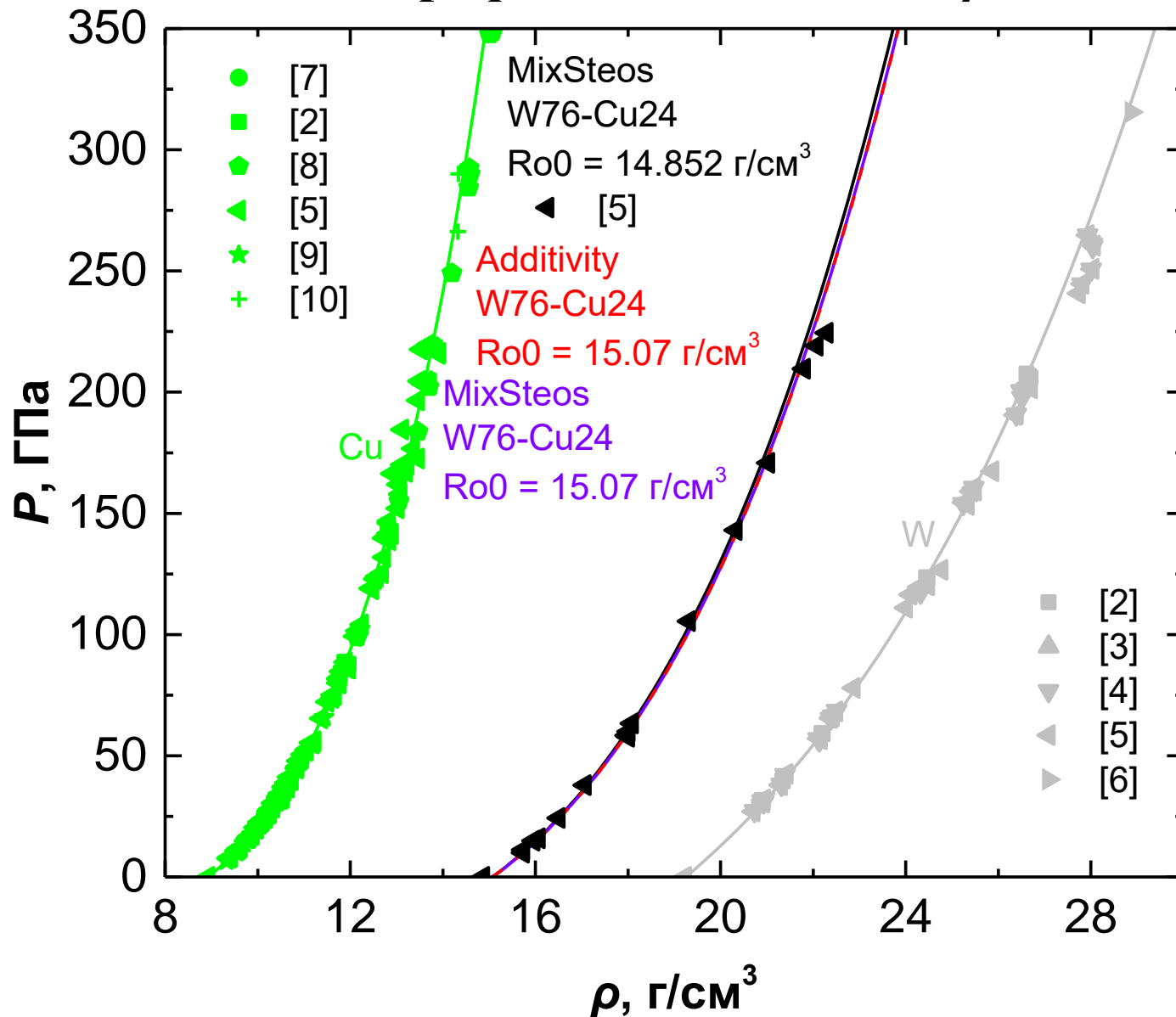


- Серая линия – ударная адиабата для сплошного материала, $m = 1$;
- Синяя линия – ударная адиабата для вольфрама с $m = 1.44$;
- Розовая линия – ударная адиабата для вольфрама с $m = 2.897$;
- Коричневая линия – ударная адиабата для вольфрама с $m = 3.497$;
- Красная линия – ударная адиабата для вольфрама с $m = 4.182$;



Сплав W(76 wt%)–Cu(24 wt%)

График зависимости $P(\rho)$

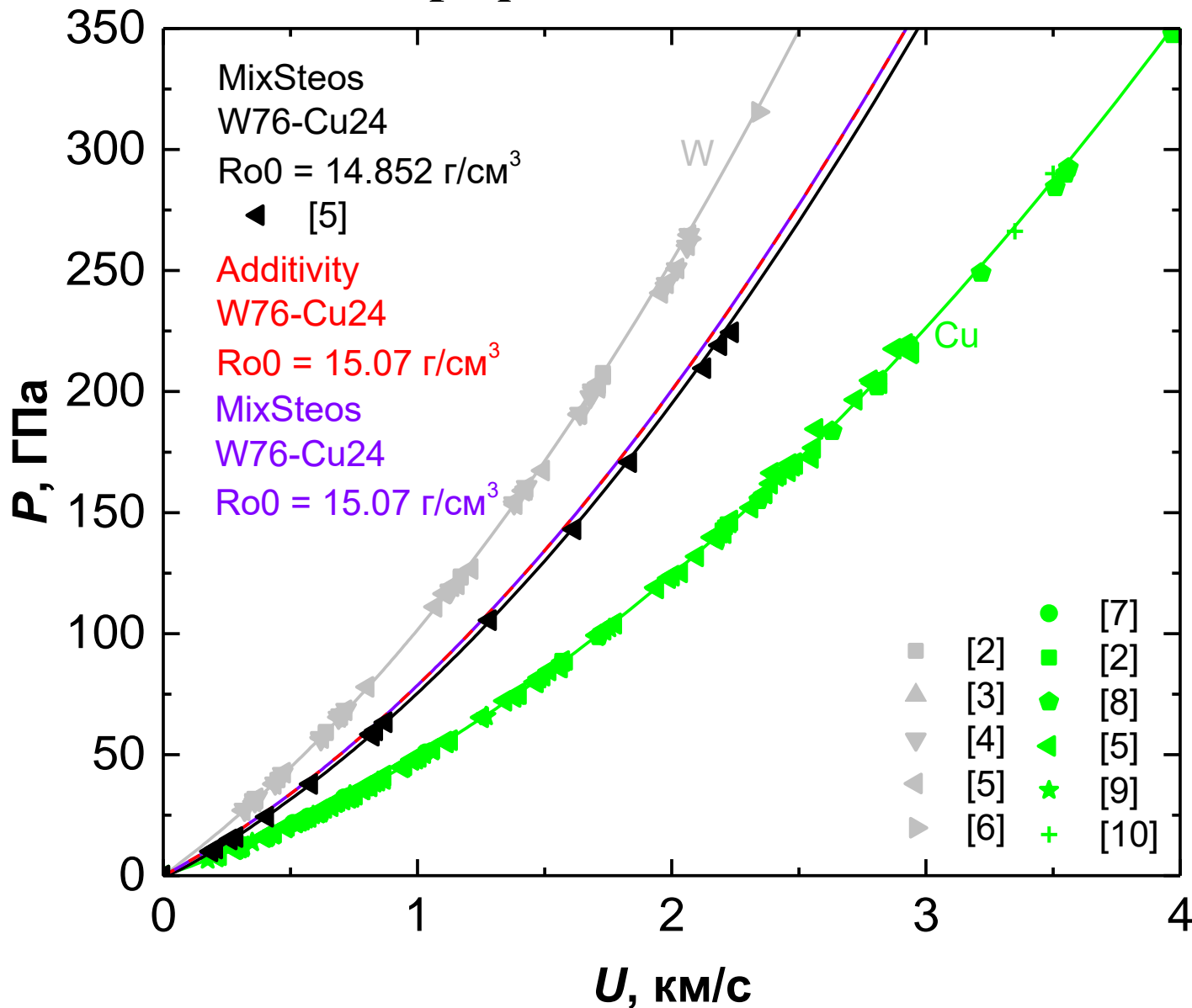


- Красная линия – ударная адиабата для сплава W(76)–Cu(24), рассчитанная нами методом аддитивности с использованием уравнения состояния для компонентов сплава, $\rho_0 = 15.07 \text{ г/см}^3$;
 - Черная и фиолетовая линии – ударные адиабаты для сплава W(76)–Cu(24), рассчитанные нами с использованием уравнения состояния STEOS сплава. Черная для экспериментальной начальной плотности $\rho_0 = 14.852 \text{ г/см}^3$, фиолетовая для начальной плотности, по методу аддитивности $\rho_0 = 15.07 \text{ г/см}^3$;
 - Черные значки – экспериментальные точки для сплава из работы [5];
 - Серая (W) и зеленая (Cu) линии – ударные адиабаты для компонентов сплава полученные нами с помощью уравнений состояния для компонентов сплава;
 - Серые значки – экспериментальные точки для W из работ [2-6];
 - Зеленые значки – экспериментальные точки для Cu из работ [2,5,7-10].
- [2]
▲ [3]
▼ [4]
▲ [5]
▶ [6]
- [2] R. G. McQueen, S. P. Marsh, Equation of state for nineteen metallic elements, J. Appl. Phys. 31, 1253-1269 (1960);
 [3] A. H. Jones, W. H. Isbell, C. J. Maiden, Measurements of the very high-pressure properties of materials using a light-gas gun. J. Appl. Phys., 37, 3493-3499 (1966);
 [4] R. G. McQueen, S. P. Marsh, J. W. Taylor, J. N. Fritz, W. J. Carter, The equation of state of solids from shock wave studies. - In: High Velocity Impact Phenomena / Ed. R. Kinslow. - New-York: Academic Press, p.293-417; appendices on pp. 515-568 (1970);
 [5] S. P. Marsh (Ed.), LASL Shock Hugoniot Data, (Univ. California Press, Berkeley, 1980);
 [6] R. S. Hixson, J. N. Fritz, Shock compression of tungsten and molybdenum. J. Appl. Phys. 71(4), 1721-1728 (1992);
 [7] J. M. Walsh, M. H. Rice, R. G. McQueen, F. L. Yarger, Shock-wave compressions of twenty-seven metals equations of state of metals, Phys. Rev. 108, 196-216 (1957);
 [8] W. H. Isbell, F. H. Shipman, A. H. Jones, Hugoniot equation of state measurements for eleven materials to five megabars. - General Motors Corp., Mat.Sci.Lab. Report MSL-68-13, 1968;
 [9] L. V. Al'tshuler, A. A. Bakanova, I. P. Dudoladov, E. A. Dynin, R. F. Trunin, B. S. Chekin, Shock adiabats for metals. New data, statistical analysis and general regularities, Zh. Prikl. Mekh. Tekhn. Fiz. 2, 3-34 (1981) [in Russian] (J. Appl. Mech. Techn. Phys. 22, 145 (1981));
 [10] B. L. Glushak, A. P. Zharkov, M. V. Zhernokletov, V. Ya. Ternovoi, A. S. Filimonov, V. E. Fortov, Experimental investigation of the thermodynamics of dense plasmas formed from metals at high energy concentrations, Zh. Eksp. Teor. Fiz. 96, 1301-1318 (1989) [in Russian] (Sov. Phys. - JETP 69(4), 739-749 (1989)).



Сплав W(76 wt%)–Cu(24 wt%)

График зависимости $P(U)$



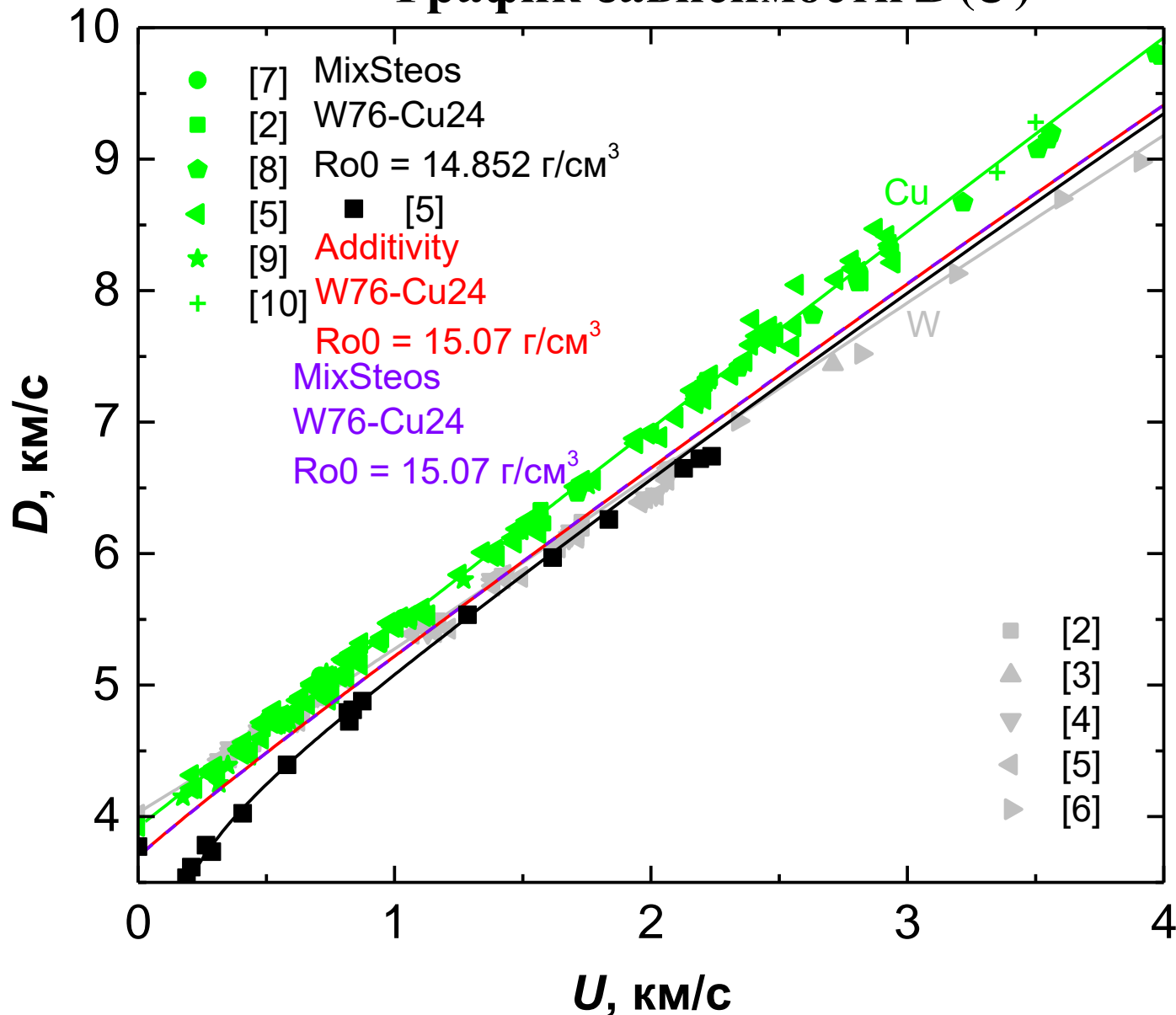
- Красная линия – ударная адиабата для сплава W(76)–Cu(24), рассчитанная нами методом аддитивности с использованием уравнения состояния для компонентов сплава, $\rho_0 = 15.07 \text{ г/см}^3$;
- Черная и фиолетовая линии – ударные адиабаты для сплава W(76)–Cu(24), рассчитанные нами с использованием уравнения состояния STEOS сплава. Черная для экспериментальной начальной плотности $\rho_0 = 14.852 \text{ г/см}^3$, фиолетовая для начальной плотности, по методу аддитивности $\rho_0 = 15.07 \text{ г/см}^3$;
- Черные значки – экспериментальные точки для сплава из работы [5];
- Серая (W) и зеленая (Cu) линии – ударные адиабаты для компонентов сплава полученные нами с помощью уравнений состояния для компонентов сплава;
- Серые значки – экспериментальные точки для W из работ [2-6];
- Зеленые значки – экспериментальные точки для Cu из работ [2,5,7-10].

[2] R. G. McQueen, S. P. Marsh, Equation of state for nineteen metallic elements, J. Appl. Phys. 31, 1253-1269 (1960);
 [3] A. H. Jones, W. H. Isbell, C. J. Maiden, Measurements of the very high-pressure properties of materials using a light-gas gun. J. Appl. Phys., 37, 3493-3499 (1966);
 [4] R. G. McQueen, S. P. Marsh, J. W. Taylor, J. N. Fritz, W. J. Carter, The equation of state of solids from shock wave studies. - In: High Velocity Impact Phenomena / Ed. R.Kinslow. - New-York: Academic Press, p.293-417; appendices on pp. 515-568 (1970);
 [5] S. P. Marsh (Ed.), LASL Shock Hugoniot Data, (Univ. California Press, Berkeley, 1980);
 [6] R. S. Hixson, J. N. Fritz, Shock compression of tungsten and molybdenum. J. Appl. Phys. 71(4), 1721-1728 (1992);
 [7] J. M. Walsh, M. H. Rice, R. G. McQueen, F. L. Yarger, Shock-wave compressions of twenty-seven metals equations of state of metals, Phys. Rev. 108, 196-216 (1957);
 [8] W. H. Isbell, F. H. Shipman, A. H. Jones, Hugoniot equation of state measurements for eleven materials to five megabars. - General Motors Corp., Mat.Sci.Lab. Report MSL-68-13, 1968;
 [9] L. V. Al'tshuler, A. A. Bakanova, I. P. Dudoladov, E. A. Dynin, R. F. Trunin, B. S. Chekin, Shock adiabats for metals. New data, statistical analysis and general regularities, Zh. Prikl. Mekh. Tekhn. Fiz. 2, 3-34 (1981) [in Russian] (J. Appl. Mech. Techn. Phys. 22, 145 (1981));
 [10] B. L. Glushak, A. P. Zharkov, M. V. Zhernokletov, V. Ya. Ternovoi, A. S. Filimonov, V. E. Fortov, Experimental investigation of the thermodynamics of dense plasmas formed from metals at high energy concentrations, Zh. Eksp. Teor. Fiz. 96, 1301-1318 (1989) [in Russian] (Sov. Phys. - JETP 69(4), 739-749 (1989)).



Сплав W(76 wt%)–Cu(24 wt%)

График зависимости $D(U)$



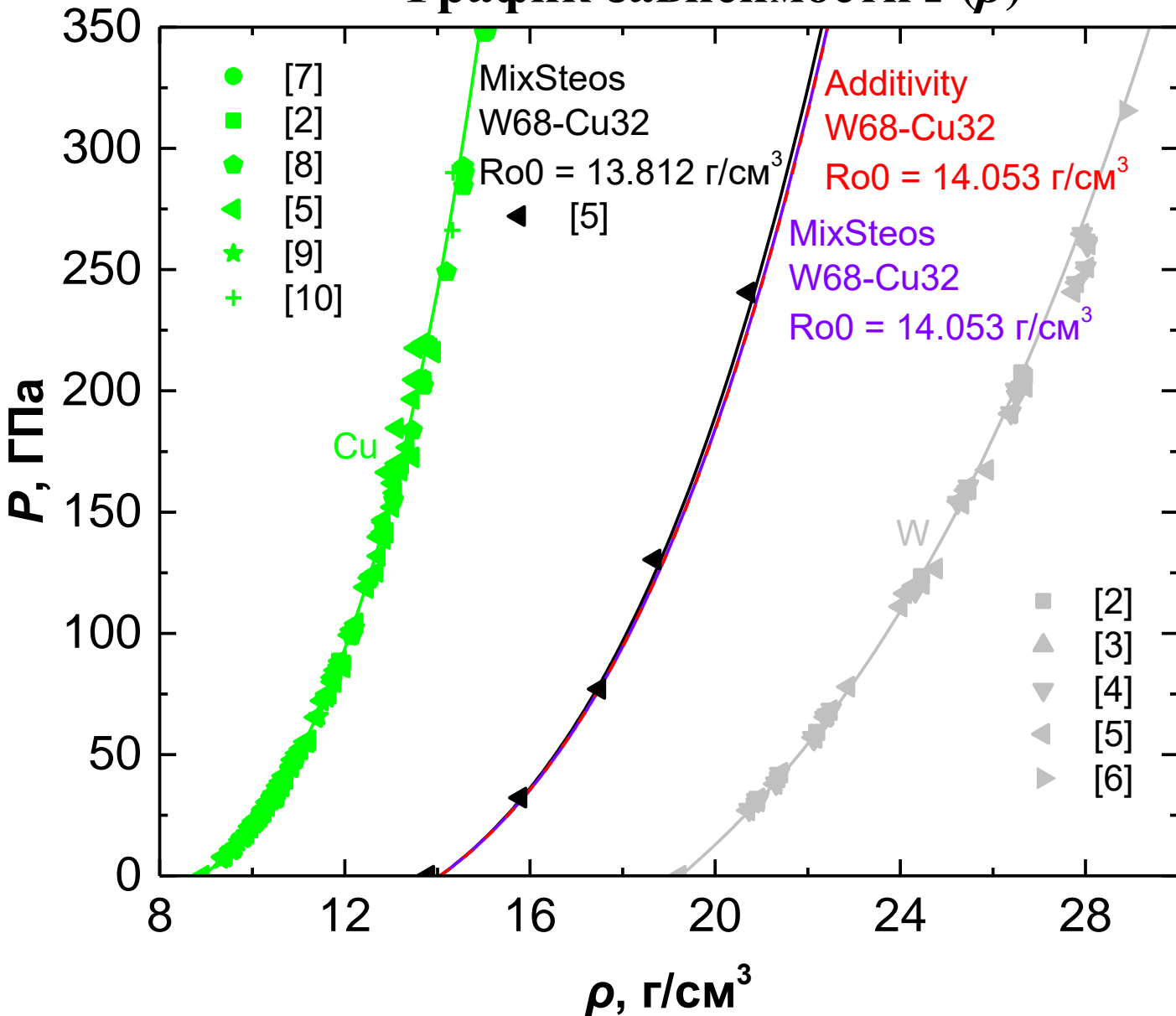
- Красная линия – ударная адиабата для сплава W(76)–Cu(24), рассчитанная нами методом аддитивности с использованием уравнения состояния для компонентов сплава, $\rho_0 = 15.07 \text{ г/см}^3$;
- Черная и фиолетовая линии – ударные адиабаты для сплава W(76)–Cu(24), рассчитанные нами с использованием уравнения состояния STEOS сплава. Черная для экспериментальной начальной плотности $\rho_0 = 14.852 \text{ г/см}^3$, фиолетовая для начальной плотности, по методу аддитивности $\rho_0 = 15.07 \text{ г/см}^3$;
- Черные значки – экспериментальные точки для сплава из работы [5];
- Серая (W) и зеленая (Cu) линии – ударные адиабаты для компонентов сплава полученные нами с помощью уравнений состояния для компонентов сплава;
- Серые значки – экспериментальные точки для W из работ [2-6];
- Зеленые значки – экспериментальные точки для Cu из работ [2,5,7-10].

[2] R. G. McQueen, S. P. Marsh, Equation of state for nineteen metallic elements, J. Appl. Phys. 31, 1253-1269 (1960);
[3] A. H. Jones, W. H. Isbell, C. J. Maiden, Measurements of the very high-pressure properties of materials using a light-gas gun. J. Appl. Phys., 37, 3493-3499 (1966);
[4] R. G. McQueen, S. P. Marsh, J. W. Taylor, J. N. Fritz, W. J. Carter, The equation of state of solids from shock wave studies. - In: High Velocity Impact Phenomena / Ed. R. Kinslow. - New-York: Academic Press, p.293-417; appendices on pp. 515-568 (1970);
[5] S. P. Marsh (Ed.), LASL Shock Hugoniot Data, (Univ. California Press, Berkeley, 1980);
[6] R. S. Hixson, J. N. Fritz, Shock compression of tungsten and molybdenum. J. Appl. Phys. 71(4), 1721-1728 (1992);
[7] J. M. Walsh, M. H. Rice, R. G. McQueen, F. L. Yarger, Shock-wave compressions of twenty-seven metals equations of state of metals, Phys. Rev. 108, 196-216 (1957);
[8] W. H. Isbell, F. H. Shipman, A. H. Jones, Hugoniot equation of state measurements for eleven materials to five megabars. - General Motors Corp., Mat.Sci.Lab. Report MSL-68-13, 1968;
[9] L. V. Al'tshuler, A. A. Bakanova, I. P. Dudoladov, E. A. Dynin, R. F. Trunin, B. S. Chekin, Shock adiabats for metals. New data, statistical analysis and general regularities, Zh. Prikl. Mekh. Tekhn. Fiz. 2, 3-34 (1981) [in Russian] (J. Appl. Mech. Techn. Phys. 22, 145 (1981));
[10] B. L. Glushak, A. P. Zharkov, M. V. Zhernokletov, V. Ya. Ternovoi, A. S. Filimonov, V. E. Fortov, Experimental investigation of the thermodynamics of dense plasmas formed from metals at high energy concentrations, Zh. Eksp. Teor. Fiz. 96, 1301-1318 (1989) [in Russian] (Sov. Phys. - JETP 69(4), 739-749 (1989)).



Сплав W(68 wt%)–Cu(32 wt%)

График зависимости $P(\rho)$



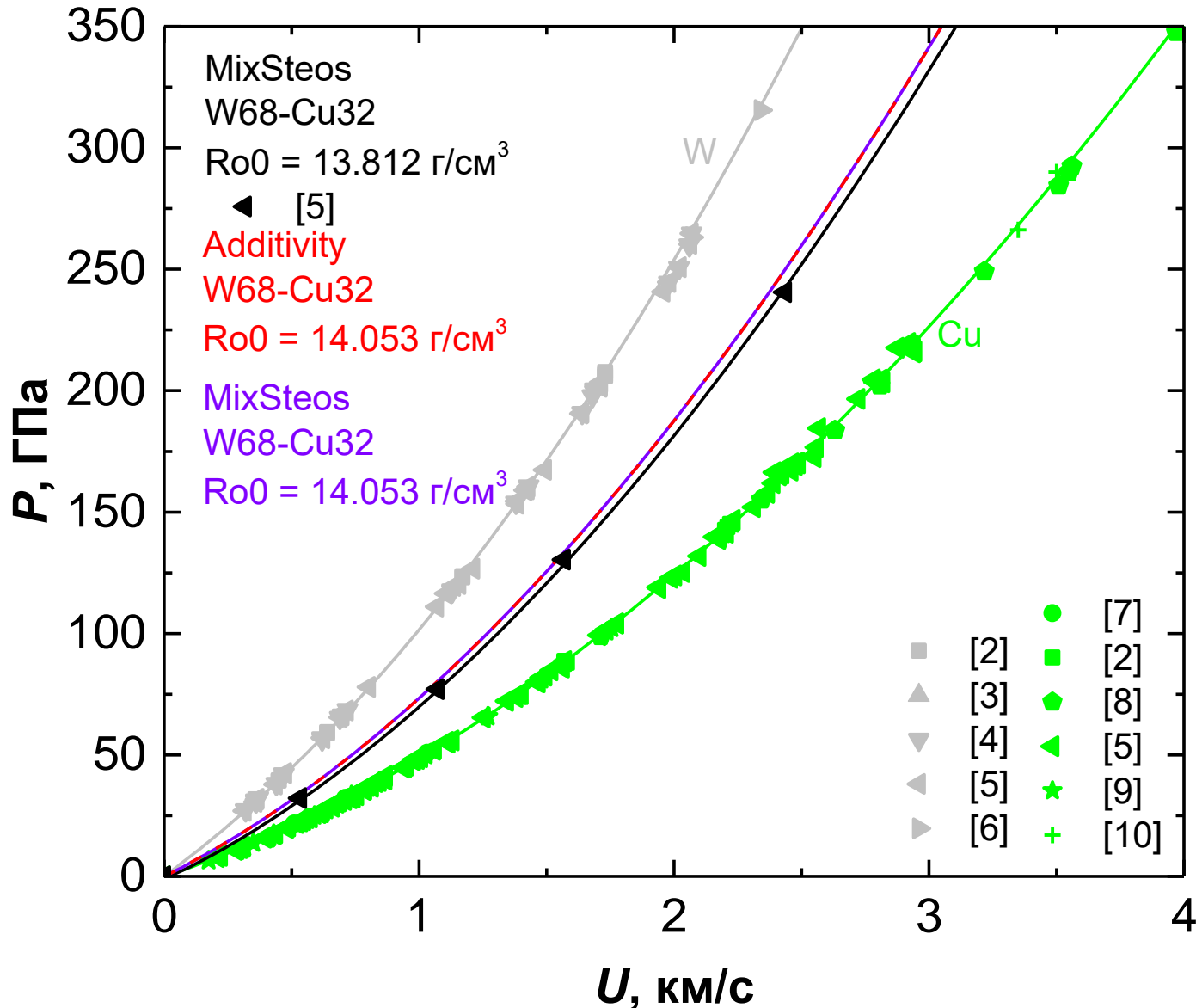
- Красная линия – ударная адиабата для сплава W(68)–Cu(32), рассчитанная нами методом аддитивности с использованием уравнения состояния для компонентов сплава, $\rho_0 = 14.053 \text{ г/см}^3$;
- Черная и фиолетовая линии – ударные адиабаты для сплава W(68)–Cu(32), рассчитанные нами с использованием уравнения состояния STEOS сплава. Черная для экспериментальной начальной плотности $\rho_0 = 13.812 \text{ г/см}^3$, фиолетовая для начальной плотности, по методу аддитивности $\rho_0 = 14.053 \text{ г/см}^3$;
- Черные значки – экспериментальные точки для сплава из работы [5];
- Серая (W) и зеленая (Cu) линии – ударные адиабаты для компонентов сплава полученные нами с помощью уравнений состояния для компонентов сплава;
- Серые значки – экспериментальные точки для W из работ [2-6];
- Зеленые значки – экспериментальные точки для Cu из работ [2,5,7-10].

[2] R. G. McQueen, S. P. Marsh, Equation of state for nineteen metallic elements, J. Appl. Phys. 31, 1253-1269 (1960);
 [3] A. H. Jones, W. H. Isbell, C. J. Maiden, Measurements of the very high-pressure properties of materials using a light-gas gun. J. Appl. Phys., 37, 3493-3499 (1966);
 [4] R. G. McQueen, S. P. Marsh, J. W. Taylor, J. N. Fritz, W. J. Carter, The equation of state of solids from shock wave studies. - In: High Velocity Impact Phenomena / Ed. R. Kinslow. - New-York: Academic Press, p.293-417; appendices on pp. 515-568 (1970);
 [5] S. P. Marsh (Ed.), LASL Shock Hugoniot Data, (Univ. California Press, Berkeley, 1980);
 [6] R. S. Hixson, J. N. Fritz, Shock compression of tungsten and molybdenum. J. Appl. Phys. 71(4), 1721-1728 (1992);
 [7] J. M. Walsh, M. H. Rice, R. G. McQueen, F. L. Yarger, Shock-wave compressions of twenty-seven metals equations of state of metals, Phys. Rev. 108, 196-216 (1957);
 [8] W. H. Isbell, F. H. Shipman, A. H. Jones, Hugoniot equation of state measurements for eleven materials to five megabars. - General Motors Corp., Mat.Sci.Lab. Report MSL-68-13, 1968;
 [9] L. V. Al'tshuler, A. A. Bakanova, I. P. Dudoladov, E. A. Dynin, R. F. Trunin, B. S. Chekin, Shock adiabats for metals. New data, statistical analysis and general regularities, Zh. Prikl. Mekh. Tekhn. Fiz. 2, 3-34 (1981) [in Russian] (J. Appl. Mech. Techn. Phys. 22, 145 (1981));
 [10] B. L. Glushak, A. P. Zharkov, M. V. Zhernokletov, V. Ya. Ternovoi, A. S. Filimonov, V. E. Fortov, Experimental investigation of the thermodynamics of dense plasmas formed from metals at high energy concentrations, Zh. Eksp. Teor. Fiz. 96, 1301-1318 (1989) [in Russian] (Sov. Phys. - JETP 69(4), 739-749 (1989)).



Сплав W(68 wt%)–Cu(32 wt%)

График зависимости $P(U)$



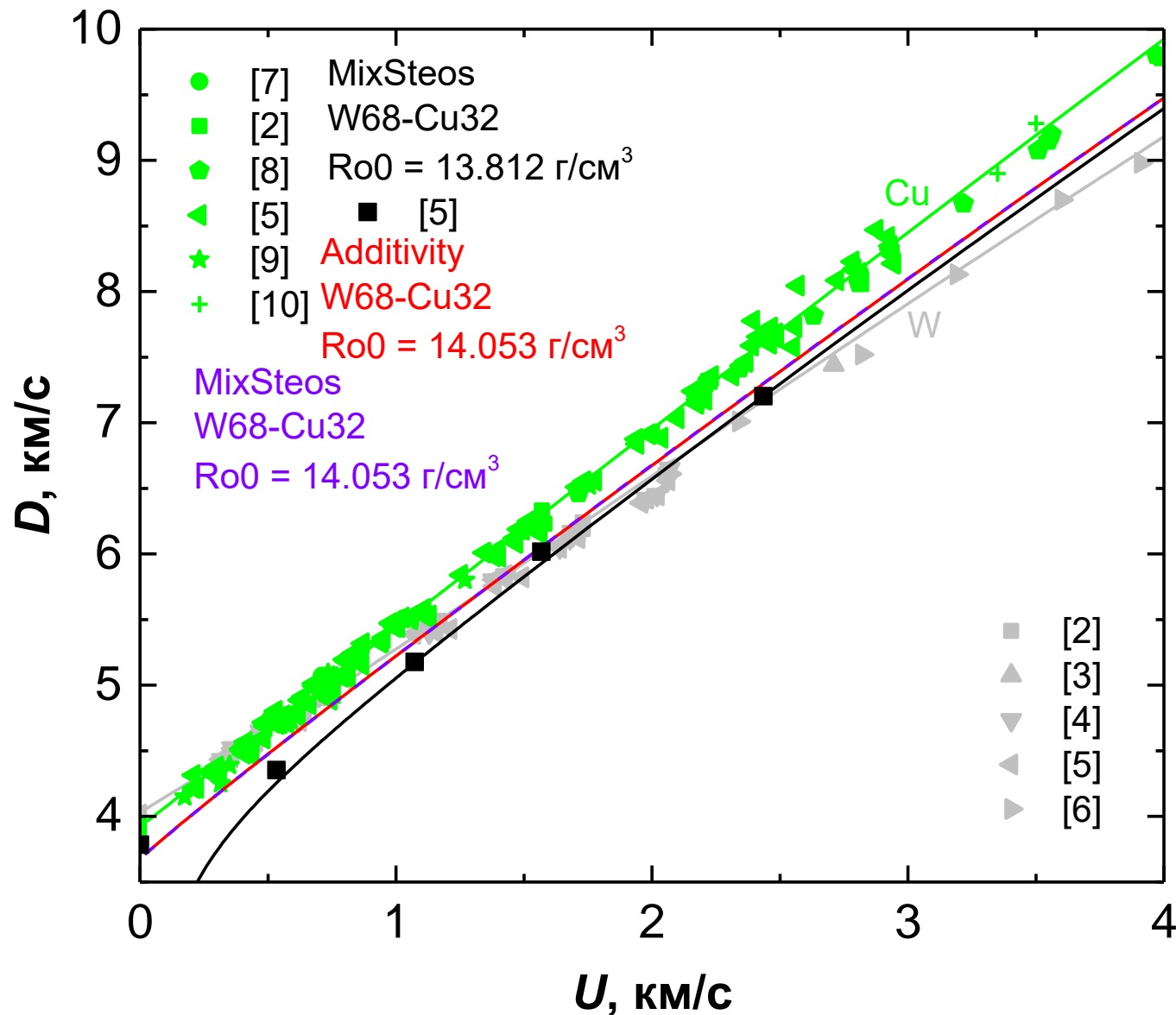
- Красная линия – ударная адиабата для сплава W(68)–Cu(32), рассчитанная нами методом аддитивности с использованием уравнения состояния для компонентов сплава, $\rho_0 = 14.053 \text{ г/см}^3$;
- Черная и фиолетовая линии – ударные адиабаты для сплава W(68)–Cu(32), рассчитанные нами с использованием уравнения состояния STEOS сплава. Черная для экспериментальной начальной плотности $\rho_0 = 13.812 \text{ г/см}^3$, фиолетовая для начальной плотности, по методу аддитивности $\rho_0 = 14.053 \text{ г/см}^3$;
- Черные значки – экспериментальные точки для сплава из работы [5];
- Серая (W) и зеленая (Cu) линии – ударные адиабаты для компонентов сплава полученные нами с помощью уравнений состояния для компонентов сплава;
- Серые значки – экспериментальные точки для W из работ [2-6];
- Зеленые значки – экспериментальные точки для Cu из работ [2,5,7-10].

[2] R. G. McQueen, S. P. Marsh, Equation of state for nineteen metallic elements, J. Appl. Phys. 31, 1253-1269 (1960);
 [3] A. H. Jones, W. H. Isbell, C. J. Maiden, Measurements of the very high-pressure properties of materials using a light-gas gun. J. Appl. Phys., 37, 3493-3499 (1966);
 [4] R. G. McQueen, S. P. Marsh, J. W. Taylor, J. N. Fritz, W. J. Carter, The equation of state of solids from shock wave studies. - In: High Velocity Impact Phenomena / Ed. R. Kinslow. - New-York: Academic Press, p.293-417; appendices on pp. 515-568 (1970);
 [5] S. P. Marsh (Ed.), LASL Shock Hugoniot Data, (Univ. California Press, Berkeley, 1980);
 [6] R. S. Hixson, J. N. Fritz, Shock compression of tungsten and molybdenum. J. Appl. Phys. 71(4), 1721-1728 (1992);
 [7] J. M. Walsh, M. H. Rice, R. G. McQueen, F. L. Yarger, Shock-wave compressions of twenty-seven metals equations of state of metals, Phys. Rev. 108, 196-216 (1957);
 [8] W. H. Isbell, F. H. Shipman, A. H. Jones, Hugoniot equation of state measurements for eleven materials to five megabars. - General Motors Corp., Mat.Sci.Lab. Report MSL-68-13, 1968;
 [9] L. V. Al'tshuler, A. A. Bakanova, I. P. Dudoladov, E. A. Dynin, R. F. Trunin, B. S. Chekin, Shock adiabats for metals. New data, statistical analysis and general regularities, Zh. Prikl. Mekh. Tekhn. Fiz. 2, 3-34 (1981) [in Russian] (J. Appl. Mech. Techn. Phys. 22, 145 (1981));
 [10] B. L. Glushak, A. P. Zharkov, M. V. Zhernokletov, V. Ya. Ternovoi, A. S. Filimonov, V. E. Fortov, Experimental investigation of the thermodynamics of dense plasmas formed from metals at high energy concentrations, Zh. Eksp. Teor. Fiz. 96, 1301-1318 (1989) [in Russian] (Sov. Phys. - JETP 69(4), 739-749 (1989)).



Сплав W(68 wt%)–Cu(32 wt%)

График зависимости $D(U)$



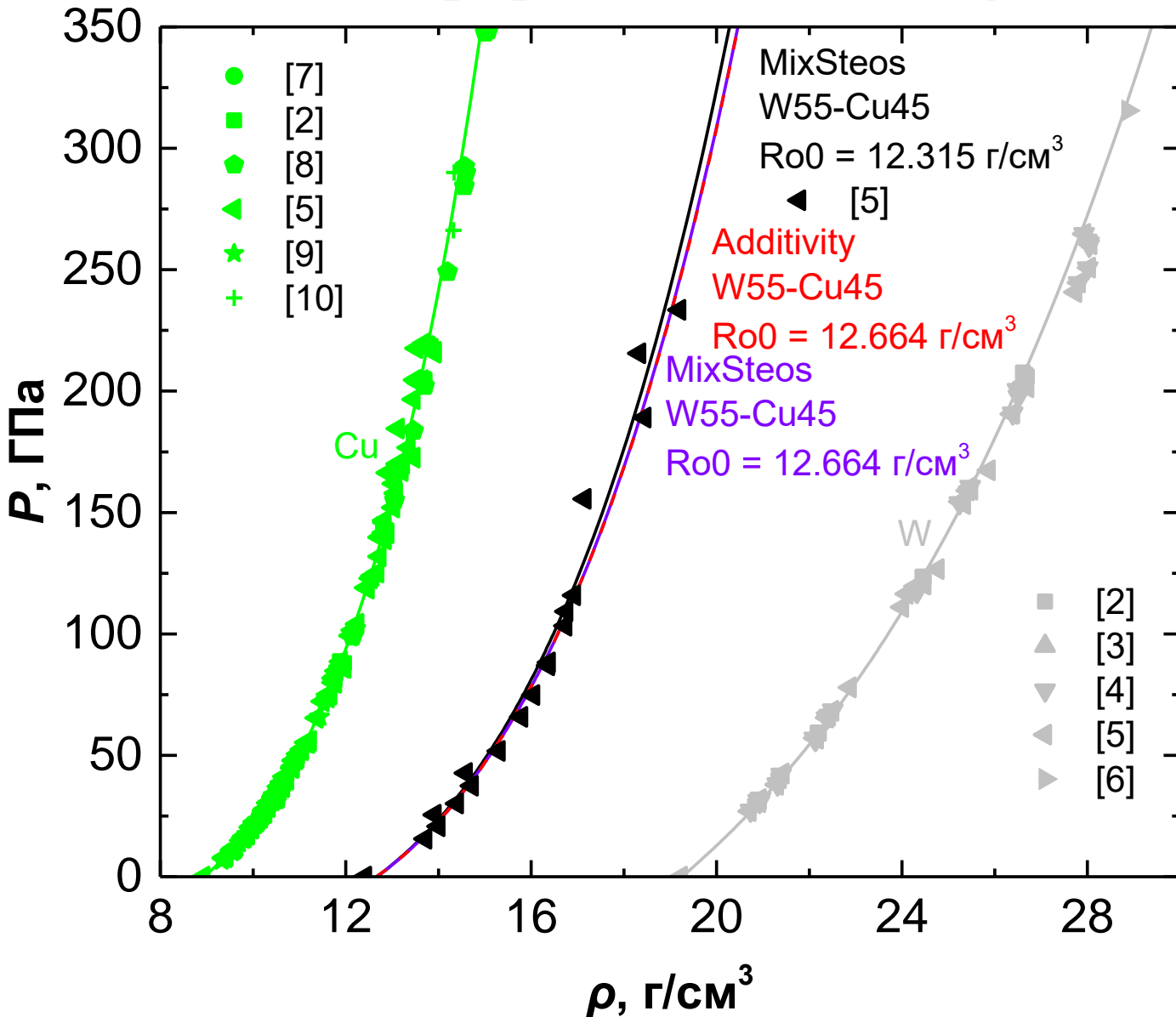
- Красная линия – ударная адиабата для сплава W(68)–Cu(32), рассчитанная нами методом аддитивности с использованием уравнения состояния для компонентов сплава, $\rho_0 = 14.053 \text{ г/см}^3$;
- Черная и фиолетовая линии – ударные адиабаты для сплава W(68)–Cu(32), рассчитанные нами с использованием уравнения состояния STEOS сплава. Черная для экспериментальной начальной плотности $\rho_0 = 13.812 \text{ г/см}^3$, фиолетовая для начальной плотности, по методу аддитивности $\rho_0 = 14.053 \text{ г/см}^3$;
- Черные значки – экспериментальные точки для сплава из работы [5];
- Серая (W) и зеленая (Cu) линии – ударные адиабаты для компонентов сплава полученные нами с помощью уравнений состояния для компонентов сплава;
- Серые значки – экспериментальные точки для W из работ [2-6];
- Зеленые значки – экспериментальные точки для Cu из работ [2,5,7-10].

[2] R. G. McQueen, S. P. Marsh, Equation of state for nineteen metallic elements, J. Appl. Phys. 31, 1253-1269 (1960);
[3] A. H. Jones, W. H. Isbell, C. J. Maiden, Measurements of the very high-pressure properties of materials using a light-gas gun. J. Appl. Phys., 37, 3493-3499 (1966);
[4] R. G. McQueen, S. P. Marsh, J. W. Taylor, J. N. Fritz, W. J. Carter, The equation of state of solids from shock wave studies. - In: High Velocity Impact Phenomena / Ed. R. Kinslow. - New-York: Academic Press, p.293-417; appendices on pp. 515-568 (1970);
[5] S. P. Marsh (Ed.), LASL Shock Hugoniot Data, (Univ. California Press, Berkeley, 1980);
[6] R. S. Hixson, J. N. Fritz, Shock compression of tungsten and molybdenum. J. Appl. Phys. 71(4), 1721-1728 (1992);
[7] J. M. Walsh, M. H. Rice, R. G. McQueen, F. L. Yarger, Shock-wave compressions of twenty-seven metals equations of state of metals, Phys. Rev. 108, 196-216 (1957);
[8] W. H. Isbell, F. H. Shipman, A. H. Jones, Hugoniot equation of state measurements for eleven materials to five megabars. - General Motors Corp., Mat.Sci.Lab. Report MSL-68-13, 1968;
[9] L. V. Al'tshuler, A. A. Bakanova, I. P. Dudoladov, E. A. Dynin, R. F. Trunin, B. S. Chekin, Shock adiabats for metals. New data, statistical analysis and general regularities, Zh. Prikl. Mekh. Tekhn. Fiz. 2, 3-34 (1981) [in Russian] (J. Appl. Mech. Techn. Phys. 22, 145 (1981));
[10] B. L. Glushak, A. P. Zharkov, M. V. Zhernokletov, V. Ya. Ternovoi, A. S. Filimonov, V. E. Fortov, Experimental investigation of the thermodynamics of dense plasmas formed from metals at high energy concentrations, Zh. Eksp. Teor. Fiz. 96, 1301-1318 (1989) [in Russian] (Sov. Phys. - JETP 69(4), 739-749 (1989)).



Сплав W(55 wt%)–Cu(45 wt%)

График зависимости $P(\rho)$

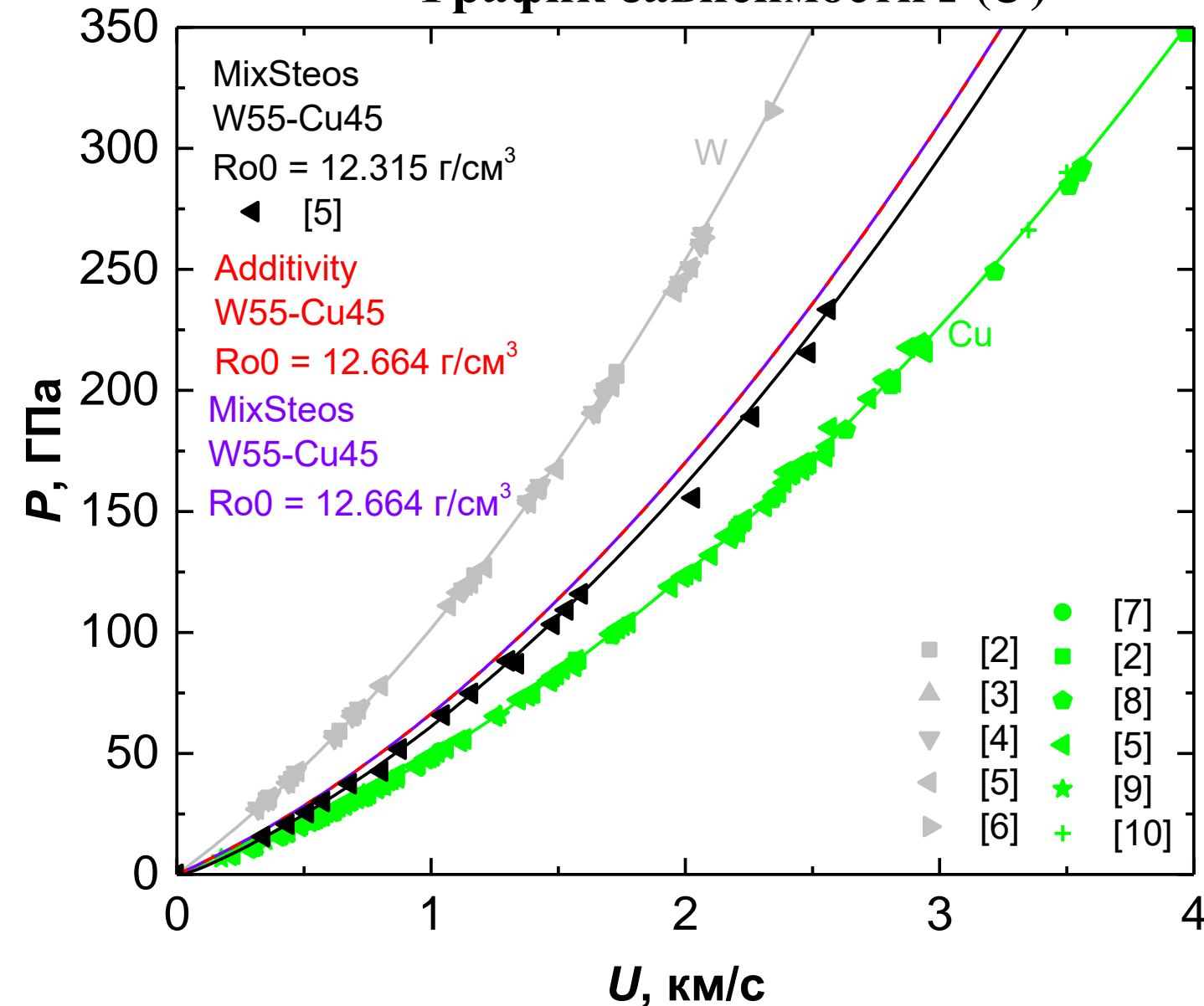


- Красная линия – ударная адиабата для сплава W(55)–Cu(45), рассчитанная нами методом аддитивности с использованием уравнения состояния для компонентов сплава, $\rho_0 = 12.664 \text{ г/см}^3$;
 - Черная и фиолетовая линии – ударные адиабаты для сплава W(55)–Cu(45), рассчитанные нами с использованием уравнения состояния STEOS сплава. Черная для экспериментальной начальной плотности $\rho_0 = 12.315 \text{ г/см}^3$, фиолетовая для начальной плотности, по методу аддитивности $\rho_0 = 12.664 \text{ г/см}^3$;
 - Черные значки – экспериментальные точки для сплава из работы [5];
 - Серая (W) и зеленая (Cu) линии – ударные адиабаты для компонентов сплава полученные нами с помощью уравнений состояния для компонентов сплава;
 - Серые значки – экспериментальные точки для W из работ [2-6];
 - Зеленые значки – экспериментальные точки для Cu из работ [2,5,7-10].
- [2] R. G. McQueen, S. P. Marsh, Equation of state for nineteen metallic elements, J. Appl. Phys. 31, 1253-1269 (1960);
[3] A. H. Jones, W. H. Isbell, C. J. Maiden, Measurements of the very high-pressure properties of materials using a light-gas gun. J. Appl. Phys., 37, 3493-3499 (1966);
[4] R. G. McQueen, S. P. Marsh, J. W. Taylor, J. N. Fritz, W. J. Carter, The equation of state of solids from shock wave studies. - In: High Velocity Impact Phenomena / Ed. R. Kinslow. - New-York: Academic Press, p.293-417; appendices on pp. 515-568 (1970);
[5] S. P. Marsh (Ed.), LASL Shock Hugoniot Data, (Univ. California Press, Berkeley, 1980);
[6] R. S. Hixson, J. N. Fritz, Shock compression of tungsten and molybdenum. J. Appl. Phys. 71(4), 1721-1728 (1992);
[7] J. M. Walsh, M. H. Rice, R. G. McQueen, F. L. Yarger, Shock-wave compressions of twenty-seven metals equations of state of metals, Phys. Rev. 108, 196-216 (1957);
[8] W. H. Isbell, F. H. Shipman, A. H. Jones, Hugoniot equation of state measurements for eleven materials to five megabars. - General Motors Corp., Mat.Sci.Lab. Report MSL-68-13, 1968;
[9] L. V. Al'tshuler, A. A. Bakanova, I. P. Dudoladov, E. A. Dynin, R. F. Trunin, B. S. Chekin, Shock adiabats for metals. New data, statistical analysis and general regularities, Zh. Prikl. Mekh. Tekhn. Fiz. 2, 3-34 (1981) [in Russian] (J. Appl. Mech. Techn. Phys. 22, 145 (1981));
[10] B. L. Glushak, A. P. Zharkov, M. V. Zhernokletov, V. Ya. Ternovoi, A. S. Filimonov, V. E. Fortov, Experimental investigation of the thermodynamics of dense plasmas formed from metals at high energy concentrations, Zh. Eksp. Teor. Fiz. 96, 1301-1318 (1989) [in Russian] (Sov. Phys. - JETP 69(4), 739-749 (1989)).



Сплав W(55 wt%)–Cu(45 wt%)

График зависимости $P(U)$



- Красная линия – ударная адиабата для сплава W(55)–Cu(45), рассчитанная нами методом аддитивности с использованием уравнения состояния для компонентов сплава, $\rho_0 = 12.664 \text{ г/см}^3$;
- Черная и фиолетовая линии – ударные адиабаты для сплава W(55)–Cu(45), рассчитанные нами с использованием уравнения состояния STEOS сплава. Черная для экспериментальной начальной плотности $\rho_0 = 12.315 \text{ г/см}^3$, фиолетовая для начальной плотности, по методу аддитивности $\rho_0 = 12.664 \text{ г/см}^3$;
- Черные значки – экспериментальные точки для сплава из работы [5];
- Серая (W) и зеленая (Cu) линии – ударные адиабаты для компонентов сплава полученные нами с помощью уравнений состояния для компонентов сплава;
- Серые значки – экспериментальные точки для W из работ [2-6];
- Зеленые значки – экспериментальные точки для Cu из работ [2,5,7-10].

[2] R. G. McQueen, S. P. Marsh, Equation of state for nineteen metallic elements, *J. Appl. Phys.* 31, 1253-1269 (1960);

[3] A. H. Jones, W. H. Isbell, C. J. Maiden, Measurements of the very high-pressure properties of materials using a light-gas gun. *J. Appl. Phys.*, 37, 3493-3499 (1966);

[4] R. G. McQueen, S. P. Marsh, J. W. Taylor, J. N. Fritz, W. J. Carter, The equation of state of solids from shock wave studies. - In: *High Velocity Impact Phenomena* / Ed. R. Kinslow. - New-York: Academic Press, p.293-417; appendices on pp. 515-568 (1970);

[5] S. P. Marsh (Ed.), *LASL Shock Hugoniot Data*, (Univ. California Press, Berkeley, 1980);

[6] R. S. Hixson, J. N. Fritz, Shock compression of tungsten and molybdenum. *J. Appl. Phys.* 71(4), 1721-1728 (1992);

[7] J. M. Walsh, M. H. Rice, R. G. McQueen, F. L. Yarger, Shock-wave compressions of twenty-seven metals equations of state of metals, *Phys. Rev.* 108, 196-216 (1957);

[8] W. H. Isbell, F. H. Shipman, A. H. Jones, Hugoniot equation of state measurements for eleven materials to five megabars. - General Motors Corp., *Mat.Sci.Lab. Report MSL-68-13*, 1968;

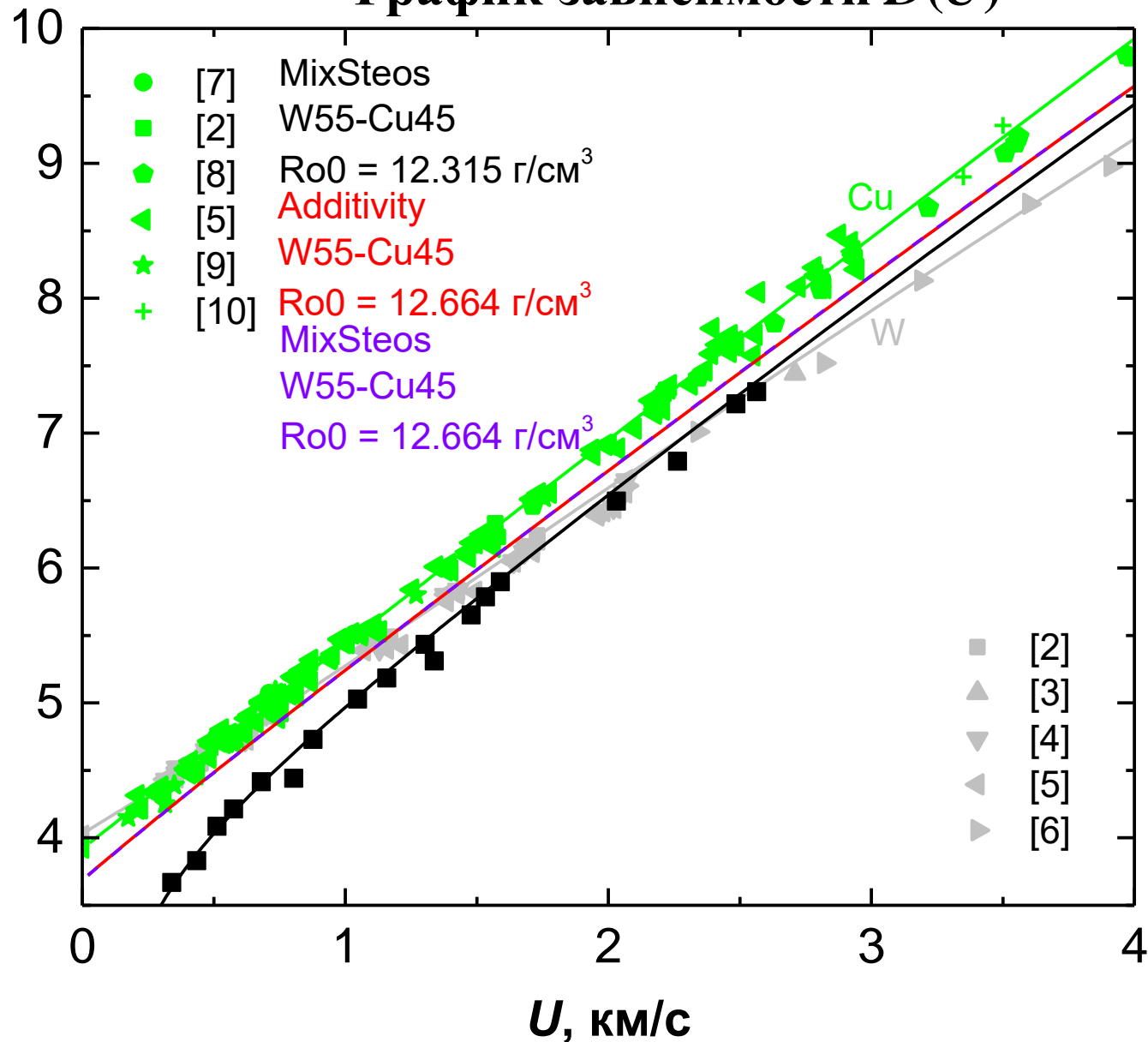
[9] L. V. Al'tshuler, A. A. Bakanova, I. P. Dudoladov, E. A. Dynin, R. F. Trunin, B. S. Chekin, Shock adiabats for metals. New data, statistical analysis and general regularities, *Zh. Prikl. Mekh. Tekhn. Fiz.* 2, 3-34 (1981) [in Russian] (*J. Appl. Mech. Techn. Phys.* 22, 145 (1981));

[10] B. L. Glushak, A. P. Zharkov, M. V. Zhernokletov, V. Ya. Ternovoi, A. S. Filimonov, V. E. Fortov, Experimental investigation of the thermodynamics of dense plasmas formed from metals at high energy concentrations, *Zh. Eksp. Teor. Fiz.* 96, 1301-1318 (1989) [in Russian] (*Sov. Phys. - JETP* 69(4), 739-749 (1989)).



Сплав Cu(45 wt%)–W(55 wt%)

График зависимости $D(U)$



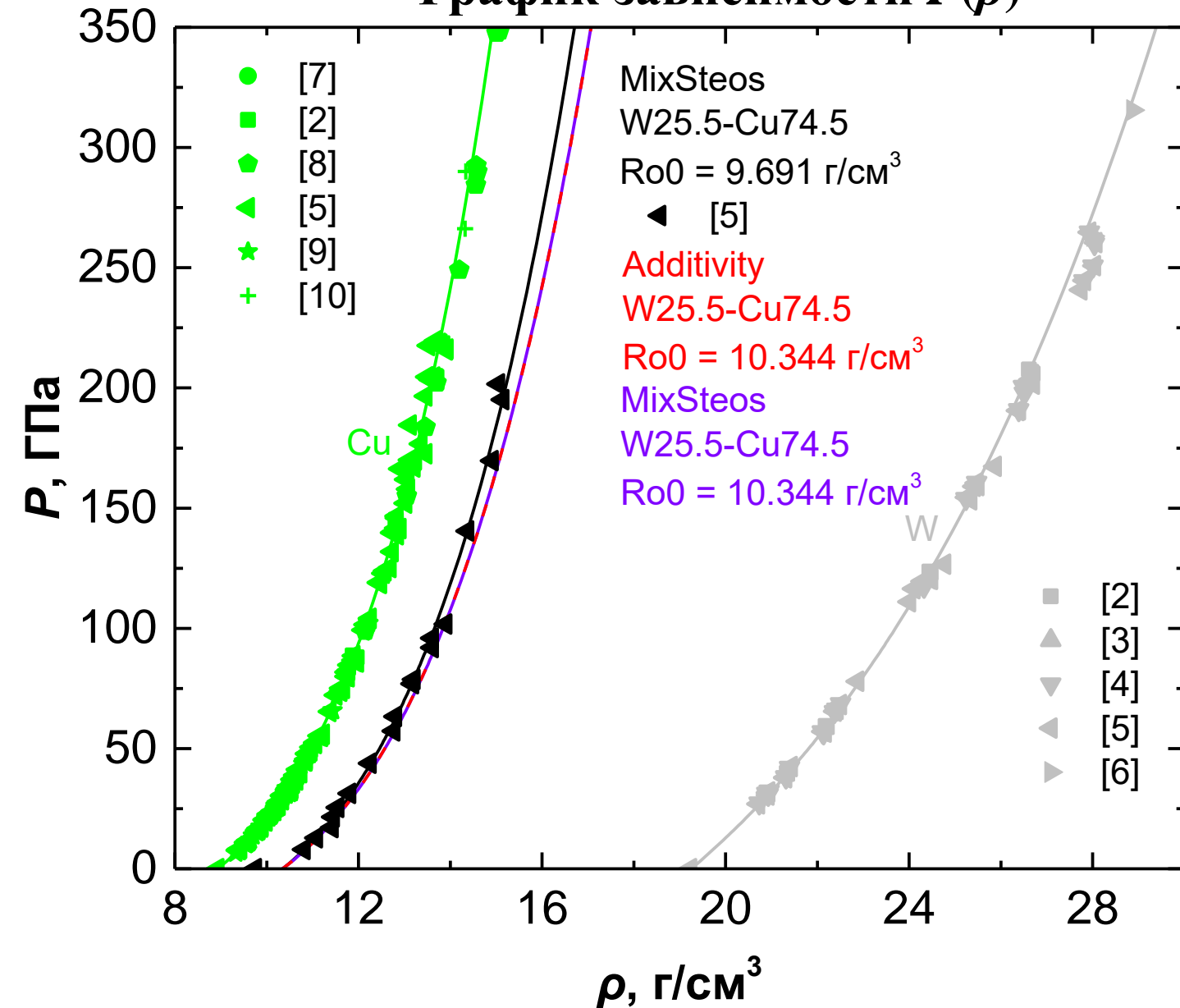
- Красная линия – ударная адиабата для сплава W(55)–Cu(45), рассчитанная нами методом аддитивности с использованием уравнения состояния для компонентов сплава, $\rho_0 = 12.664 \text{ г/см}^3$;
- Черная и фиолетовая линии – ударные адиабаты для сплава W(55)–Cu(45), рассчитанные нами с использованием уравнения состояния STEOS сплава. Черная для экспериментальной начальной плотности $\rho_0 = 12.315 \text{ г/см}^3$, фиолетовая для начальной плотности, по методу аддитивности $\rho_0 = 12.664 \text{ г/см}^3$;
- Черные значки – экспериментальные точки для сплава из работы [5];
- Серая (W) и зеленая (Cu) линии – ударные адиабаты для компонентов сплава полученные нами с помощью уравнений состояния для компонентов сплава;
- Серые значки – экспериментальные точки для W из работ [2-6];
- Зеленые значки – экспериментальные точки для Cu из работ [2,5,7-10].

[2] R. G. McQueen, S. P. Marsh, Equation of state for nineteen metallic elements, J. Appl. Phys. 31, 1253-1269 (1960);
[3] A. H. Jones, W. H. Isbell, C. J. Maiden, Measurements of the very high-pressure properties of materials using a light-gas gun. J. Appl. Phys., 37, 3493-3499 (1966);
[4] R. G. McQueen, S. P. Marsh, J. W. Taylor, J. N. Fritz, W. J. Carter, The equation of state of solids from shock wave studies. - In: High Velocity Impact Phenomena / Ed. R. Kinslow. - New-York: Academic Press, p.293-417; appendices on pp. 515-568 (1970);
[5] S. P. Marsh (Ed.), LASL Shock Hugoniot Data, (Univ. California Press, Berkeley, 1980);
[6] R. S. Hixson, J. N. Fritz, Shock compression of tungsten and molybdenum. J. Appl. Phys. 71(4), 1721-1728 (1992);
[7] J. M. Walsh, M. H. Rice, R. G. McQueen, F. L. Yarger, Shock-wave compressions of twenty-seven metals equations of state of metals, Phys. Rev. 108, 196-216 (1957);
[8] W. H. Isbell, F. H. Shipman, A. H. Jones, Hugoniot equation of state measurements for eleven materials to five megabars. - General Motors Corp., Mat.Sci.Lab. Report MSL-68-13, 1968;
[9] L. V. Al'tshuler, A. A. Bakanova, I. P. Dudoladov, E. A. Dynin, R. F. Trunin, B. S. Chekin, Shock adiabats for metals. New data, statistical analysis and general regularities, Zh. Prikl. Mekh. Tekhn. Fiz. 2, 3-34 (1981) [in Russian] (J. Appl. Mech. Techn. Phys. 22, 145 (1981));
[10] B. L. Glushak, A. P. Zharkov, M. V. Zhernokletov, V. Ya. Ternovoi, A. S. Filimonov, V. E. Fortov, Experimental investigation of the thermodynamics of dense plasmas formed from metals at high energy concentrations, Zh. Eksp. Teor. Fiz. 96, 1301-1318 (1989) [in Russian] (Sov. Phys. - JETP 69(4), 739-749 (1989)).



Сплав Cu(74.5 wt%)–W(25.5 wt%)

График зависимости $P(\rho)$



- Красная линия – ударная адиабата для сплава Cu(74.5)-W(25.5), рассчитанная нами методом аддитивности с использованием уравнения состояния для компонентов сплава, $\rho_0 = 10.344 \text{ г/см}^3$;
- Черная и фиолетовая линии – ударные адиабаты для сплава Cu(74.5)-W(25.5), рассчитанные нами с использованием уравнения состояния STEOS сплава. Черная для экспериментальной начальной плотности $\rho_0 = 9.691 \text{ г/см}^3$, фиолетовая для начальной плотности, по методу аддитивности $\rho_0 = 10.344 \text{ г/см}^3$;
- Черные значки – экспериментальные точки для сплава из работы [5];
- Серая (W) и зеленая (Cu) линии – ударные адиабаты для компонентов сплава полученные нами с помощью уравнений состояния для компонентов сплава;
- Серые значки – экспериментальные точки для W из работ [2-6];
- Зеленые значки – экспериментальные точки для Cu из работ [2,5,7-10].

[2] R. G. McQueen, S. P. Marsh, Equation of state for nineteen metallic elements, J. Appl. Phys. 31, 1253-1269 (1960);

[3] A. H. Jones, W. H. Isbell, C. J. Maiden, Measurements of the very high-pressure properties of materials using a light-gas gun. J. Appl. Phys., 37, 3493-3499 (1966);

[4] R. G. McQueen, S. P. Marsh, J. W. Taylor, J. N. Fritz, W. J. Carter, The equation of state of solids from shock wave studies. - In: High Velocity Impact Phenomena / Ed. R. Kinslow. - New-York: Academic Press, p.293-417; appendices on pp. 515-568 (1970);

[5] S. P. Marsh (Ed.), LASL Shock Hugoniot Data, (Univ. California Press, Berkeley, 1980);

[6] R. S. Hixson, J. N. Fritz, Shock compression of tungsten and molybdenum. J. Appl. Phys. 71(4), 1721-1728 (1992);

[7] J. M. Walsh, M. H. Rice, R. G. McQueen, F. L. Yarger, Shock-wave compressions of twenty-seven metals equations of state of metals, Phys. Rev. 108, 196-216 (1957);

[8] W. H. Isbell, F. H. Shipman, A. H. Jones, Hugoniot equation of state measurements for eleven materials to five megabars. - General Motors Corp., Mat.Sci.Lab. Report MSL-68-13, 1968;

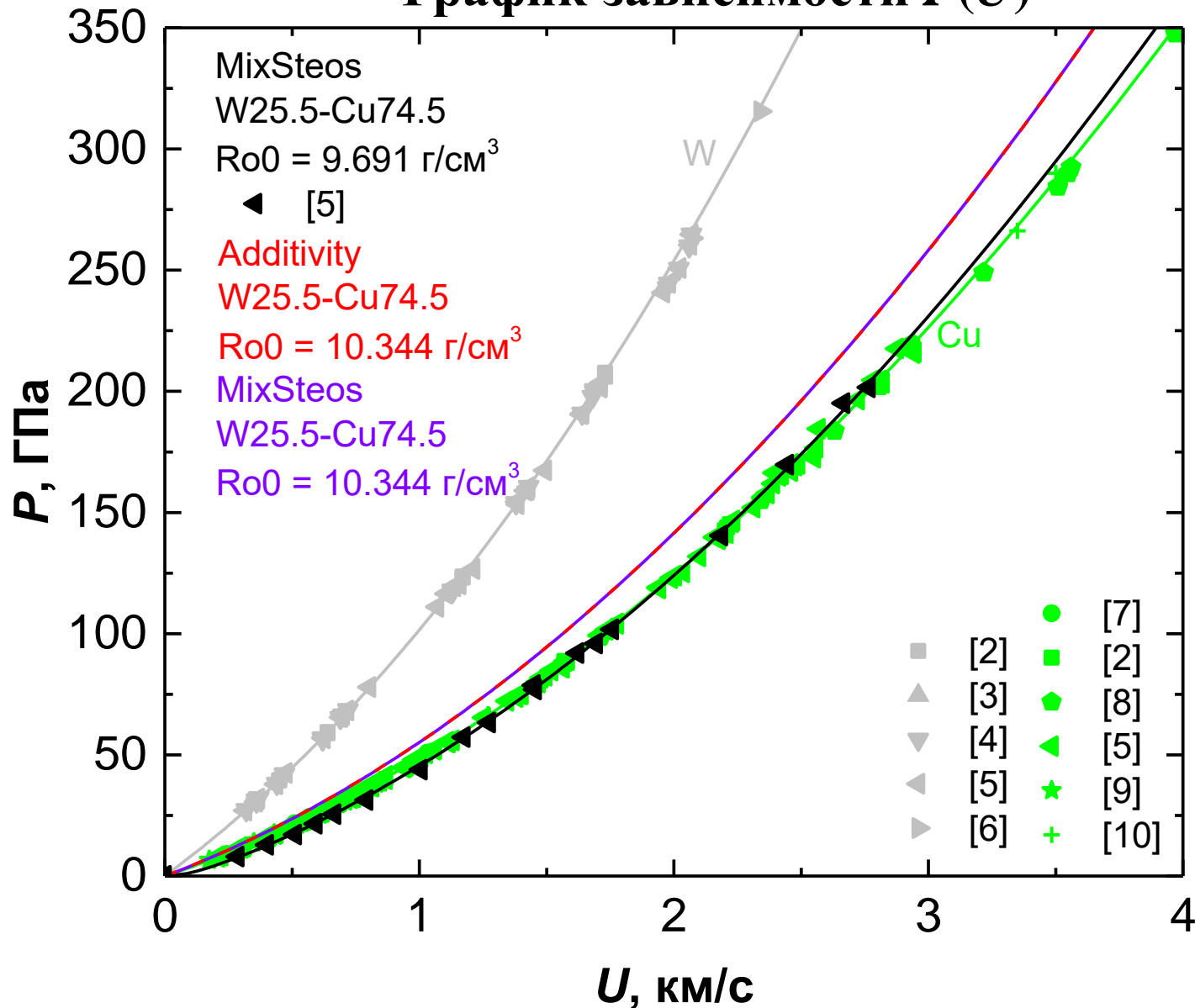
[9] L. V. Al'tshuler, A. A. Bakanova, I. P. Dudoladov, E. A. Dynin, R. F. Trunin, B. S. Chekin, Shock adiabats for metals. New data, statistical analysis and general regularities, Zh. Prikl. Mekh. Tekhn. Fiz. 2, 3-34 (1981) [in Russian] (J. Appl. Mech. Techn. Phys. 22, 145 (1981));

[10] B. L. Glushak, A. P. Zharkov, M. V. Zhernokletov, V. Ya. Ternovoi, A. S. Filimonov, V. E. Fortov, Experimental investigation of the thermodynamics of dense plasmas formed from metals at high energy concentrations, Zh. Eksp. Teor. Fiz. 96, 1301-1318 (1989) [in Russian] (Sov. Phys. - JETP 69(4), 739-749 (1989)).



Сплав Cu(74.5 wt%)–W(25.5 wt%)

График зависимости $P(U)$



- Красная линия – ударная адиабата для сплава Cu(74.5)-W(25.5), рассчитанная нами методом аддитивности с использованием уравнения состояния для компонентов сплава, $\rho_0 = 10.344 \text{ г/см}^3$;
- Черная и фиолетовая линии – ударные адиабаты для сплава Cu(74.5)-W(25.5), рассчитанные нами с использованием уравнения состояния STEOS сплава. Черная для экспериментальной начальной плотности $\rho_0 = 9.691 \text{ г/см}^3$, фиолетовая для начальной плотности, по методу аддитивности $\rho_0 = 10.344 \text{ г/см}^3$;
- Черные значки – экспериментальные точки для сплава из работы [5];
- Серая (W) и зеленая (Cu) линии – ударные адиабаты для компонентов сплава полученные нами с помощью уравнений состояния для компонентов сплава;
- Серые значки – экспериментальные точки для W из работ [2-6];
- Зеленые значки – экспериментальные точки для Cu из работ [2,5,7-10].

[2] R. G. McQueen, S. P. Marsh, Equation of state for nineteen metallic elements, J. Appl. Phys. 31, 1253-1269 (1960);

[3] A. H. Jones, W. H. Isbell, C. J. Maiden, Measurements of the very high-pressure properties of materials using a light-gas gun. J. Appl. Phys., 37, 3493-3499 (1966);

[4] R. G. McQueen, S. P. Marsh, J. W. Taylor, J. N. Fritz, W. J. Carter, The equation of state of solids from shock wave studies. - In: High Velocity Impact Phenomena / Ed. R. Kinslow. - New-York: Academic Press, p.293-417; appendices on pp. 515-568 (1970);

[5] S. P. Marsh (Ed.), LASL Shock Hugoniot Data, (Univ. California Press, Berkeley, 1980);

[6] R. S. Hixson, J. N. Fritz, Shock compression of tungsten and molybdenum. J. Appl. Phys. 71(4), 1721-1728 (1992);

[7] J. M. Walsh, M. H. Rice, R. G. McQueen, F. L. Yarger, Shock-wave compressions of twenty-seven metals equations of state of metals, Phys. Rev. 108, 196-216 (1957);

[8] W. H. Isbell, F. H. Shipman, A. H. Jones, Hugoniot equation of state measurements for eleven materials to five megabars. - General Motors Corp., Mat.Sci.Lab. Report MSL-68-13, 1968;

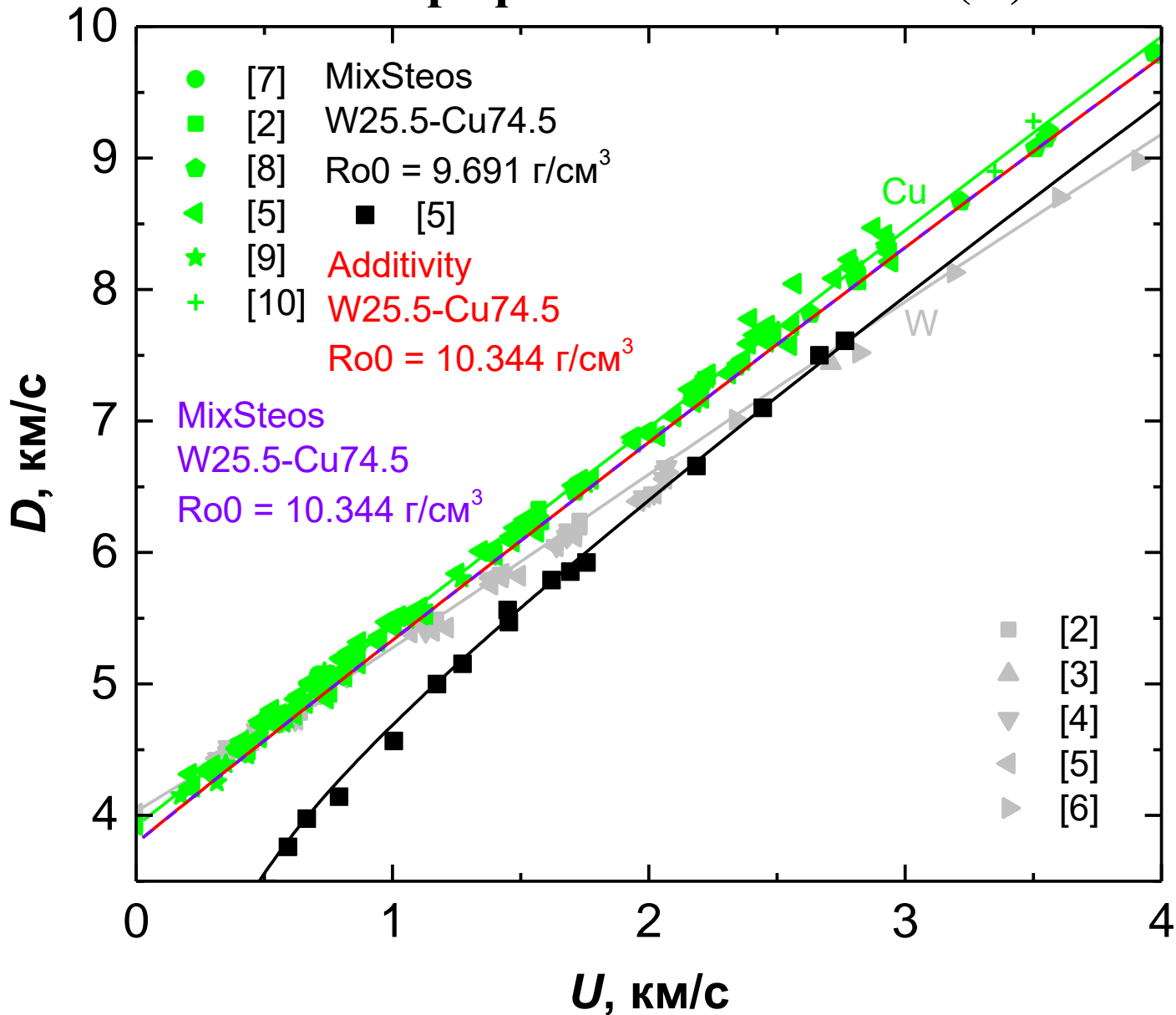
[9] L. V. Al'tshuler, A. A. Bakanova, I. P. Dudoladov, E. A. Dynin, R. F. Trunin, B. S. Chekin, Shock adiabats for metals. New data, statistical analysis and general regularities, Zh. Prikl. Mekh. Tekhn. Fiz. 2, 3-34 (1981) [in Russian] (J. Appl. Mech. Techn. Phys. 22, 145 (1981));

[10] B. L. Glushak, A. P. Zharkov, M. V. Zhernokletov, V. Ya. Ternovoi, A. S. Filimonov, V. E. Fortov, Experimental investigation of the thermodynamics of dense plasmas formed from metals at high energy concentrations, Zh. Eksp. Teor. Fiz. 96, 1301-1318 (1989) [in Russian] (Sov. Phys. - JETP 69(4), 739-749 (1989)).



Сплав Cu(74.5 wt%)-W(25.5 wt%)

График зависимости $D(U)$



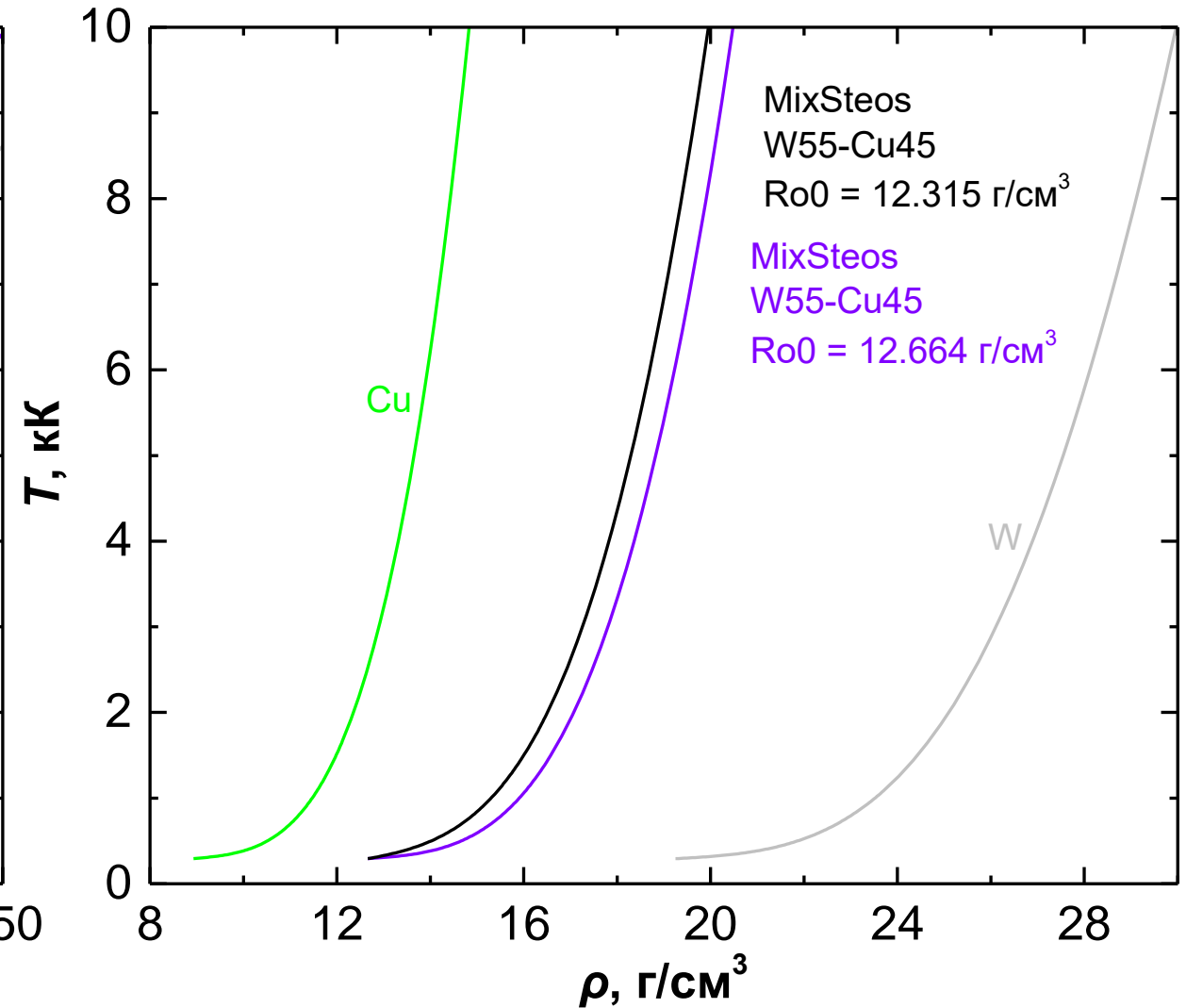
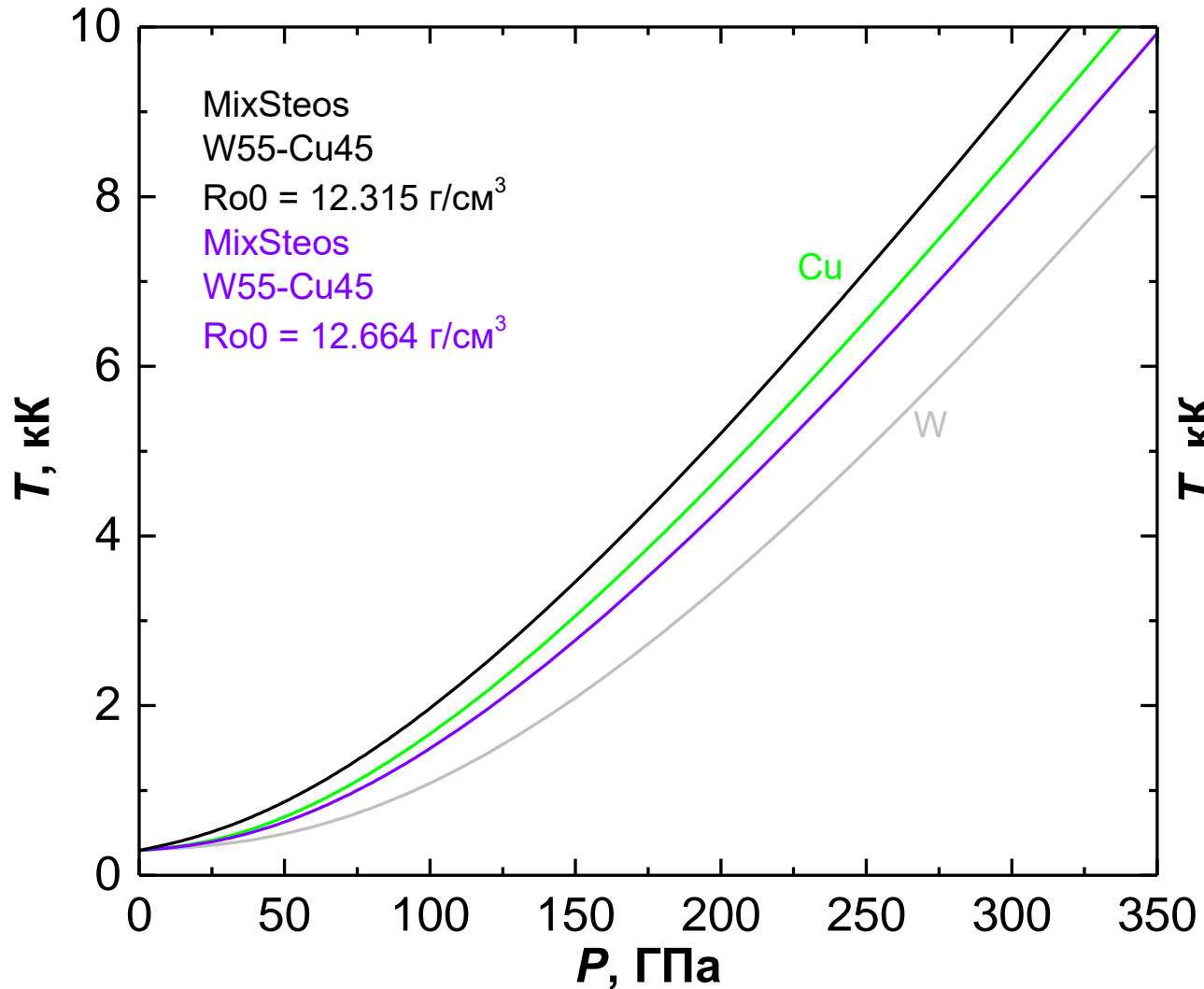
- Красная линия – ударная адиабата для сплава Cu(74.5)-W(25.5), рассчитанная нами методом аддитивности с использованием уравнения состояния для компонентов сплава, $\rho_0 = 10.344 \text{ г/см}^3$;
- Черная и фиолетовая линии – ударные адиабаты для сплава Cu(74.5)-W(25.5), рассчитанные нами с использованием уравнения состояния STEOS сплава. Черная для экспериментальной начальной плотности $\rho_0 = 9.691 \text{ г/см}^3$, фиолетовая для начальной плотности, по методу аддитивности $\rho_0 = 10.344 \text{ г/см}^3$;
- Черные значки – экспериментальные точки для сплава из работы [5];
- Серая (W) и зеленая (Cu) линии – ударные адиабаты для компонентов сплава полученные нами с помощью уравнений состояния для компонентов сплава;
- Серые значки – экспериментальные точки для W из работ [2-6];
- Зеленые значки – экспериментальные точки для Cu из работ [2,5,7-10].

[2] R. G. McQueen, S. P. Marsh, Equation of state for nineteen metallic elements, *J. Appl. Phys.* 31, 1253-1269 (1960);
 [3] A. H. Jones, W. H. Isbell, C. J. Maiden, Measurements of the very high-pressure properties of materials using a light-gas gun. *J. Appl. Phys.*, 37, 3493-3499 (1966);
 [4] R. G. McQueen, S. P. Marsh, J. W. Taylor, J. N. Fritz, W. J. Carter, The equation of state of solids from shock wave studies. - In: *High Velocity Impact Phenomena* / Ed. R. Kinslow. - New-York: Academic Press, p.293-417; appendices on pp. 515-568 (1970);
 [5] S. P. Marsh (Ed.), *LASL Shock Hugoniot Data*, (Univ. California Press, Berkeley, 1980);
 [6] R. S. Hixson, J. N. Fritz, Shock compression of tungsten and molybdenum. *J. Appl. Phys.* 71(4), 1721-1728 (1992);
 [7] J. M. Walsh, M. H. Rice, R. G. McQueen, F. L. Yarger, Shock-wave compressions of twenty-seven metals equations of state of metals, *Phys. Rev.* 108, 196-216 (1957);
 [8] W. H. Isbell, F. H. Shipman, A. H. Jones, Hugoniot equation of state measurements for eleven materials to five megabars. - General Motors Corp., *Mat.Sci.Lab. Report MSL-68-13*, 1968;
 [9] L. V. Al'tshuler, A. A. Bakanova, I. P. Dudoladov, E. A. Dynin, R. F. Trunin, B. S. Chekin, Shock adiabats for metals. New data, statistical analysis and general regularities, *Zh. Prikl. Mekh. Tekhn. Fiz.* 2, 3-34 (1981) [in Russian] (*J. Appl. Mech. Techn. Phys.* 22, 145 (1981));
 [10] B. L. Glushak, A. P. Zharkov, M. V. Zhernokletov, V. Ya. Ternovoi, A. S. Filimonov, V. E. Fortov, Experimental investigation of the thermodynamics of dense plasmas formed from metals at high energy concentrations, *Zh. Eksp. Teor. Fiz.* 96, 1301-1318 (1989) [in Russian] (*Sov. Phys. - JETP* 69(4), 739-749 (1989)).



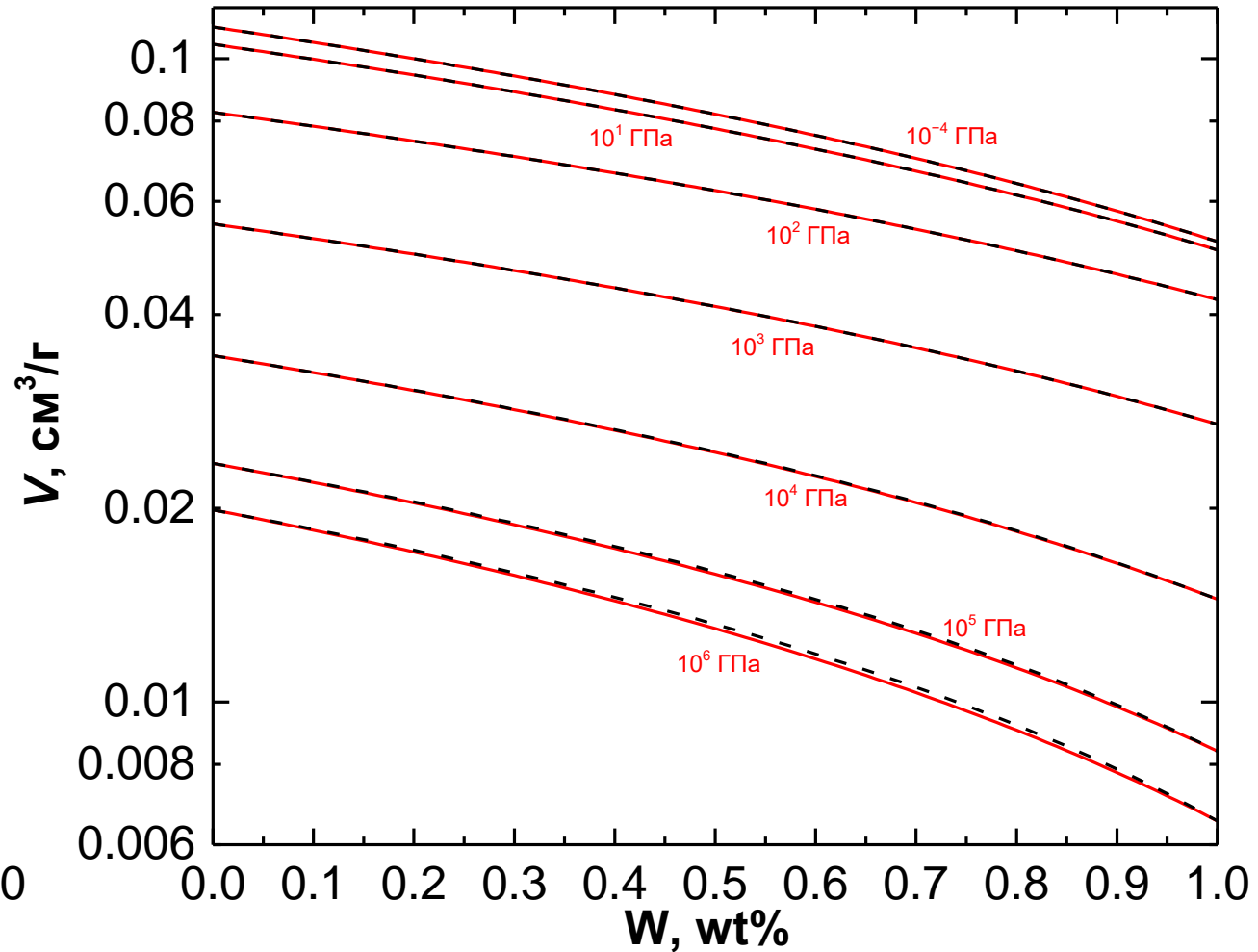
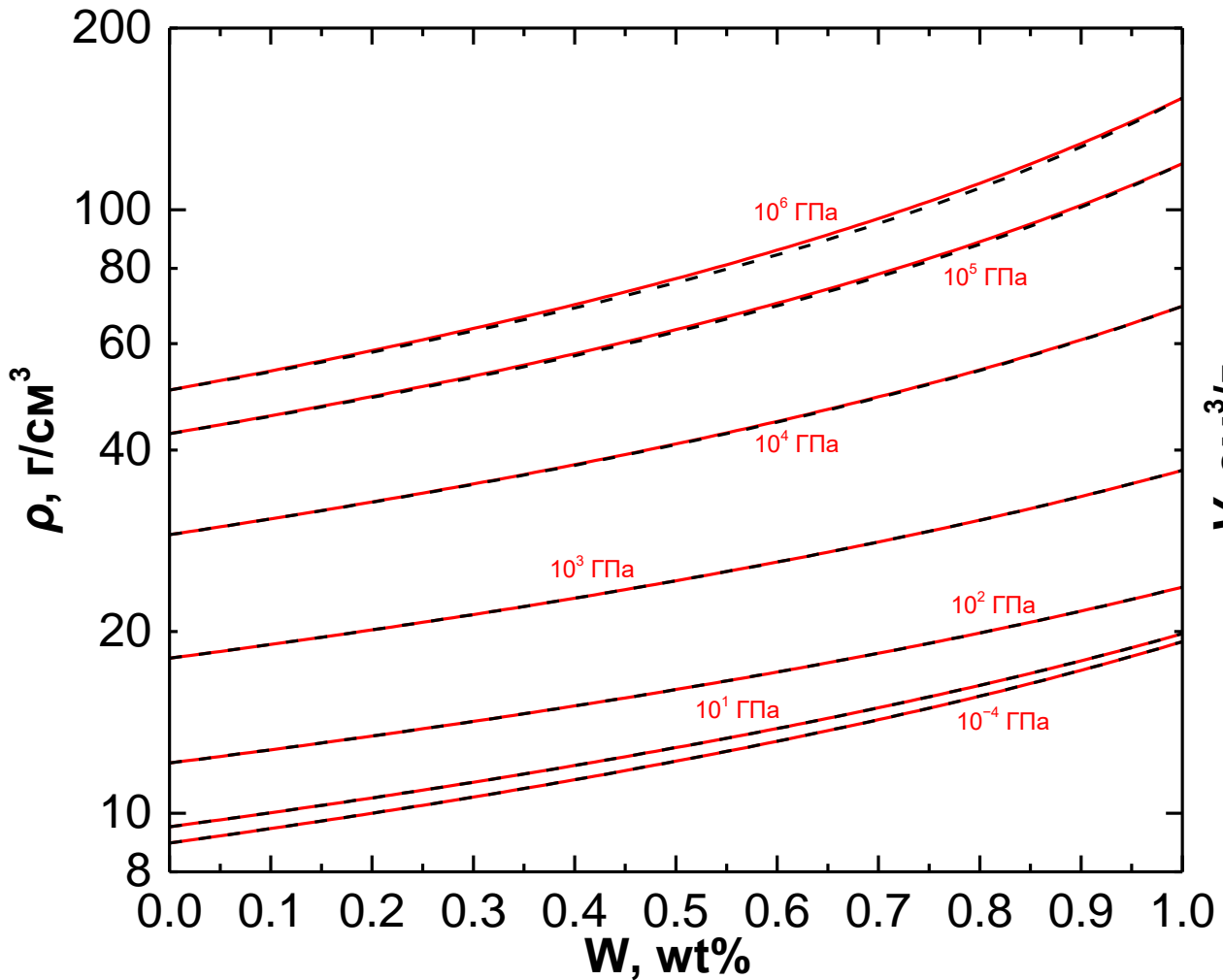
Сплав Cu(45 wt%)–W(55 wt%)

Графики зависимостей $P(T)$ и $\rho(T)$





Зависимости плотности и удельного объема сплава Cu–W от массовой доли W при заданном давлении за фронтом ударной волны



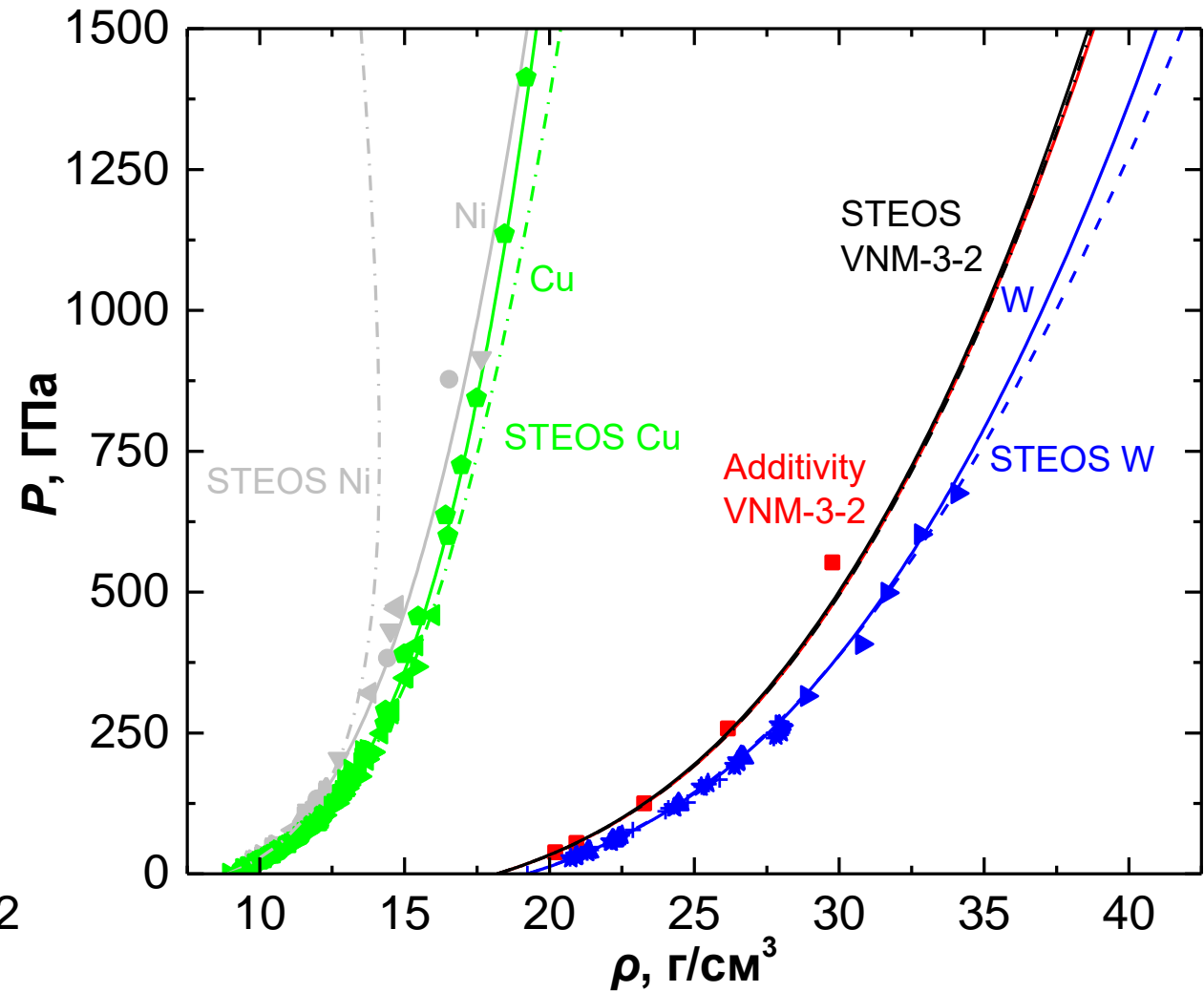
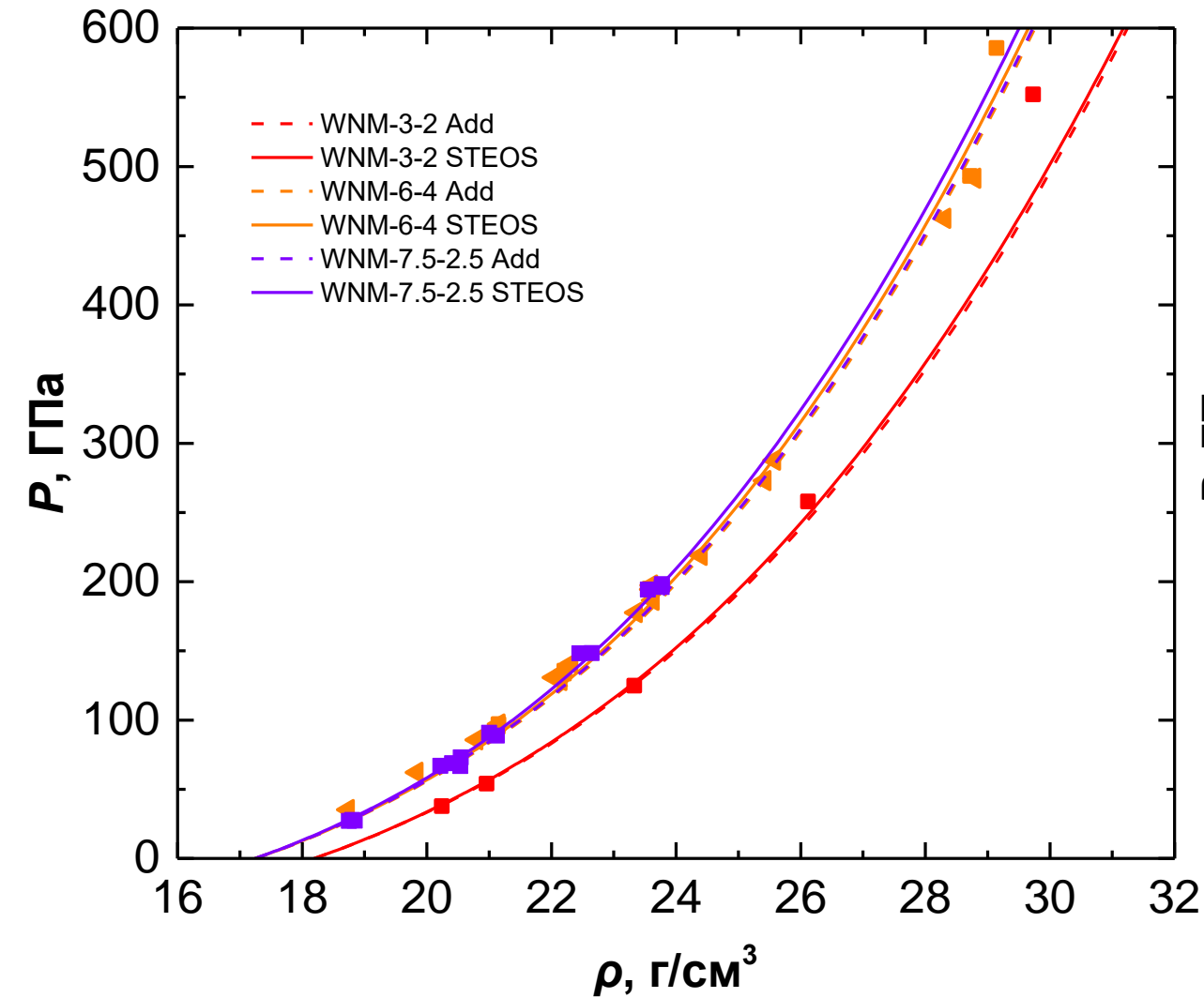
Красные линии – результаты, полученные с помощью уравнения состояния сплава

Черные линии – результаты, полученные методом аддитивности ударных адиабат компонентов сплава



Сплавы вольфрам-никель-медь (ВНМ)

Графики зависимостей $P(\rho)$



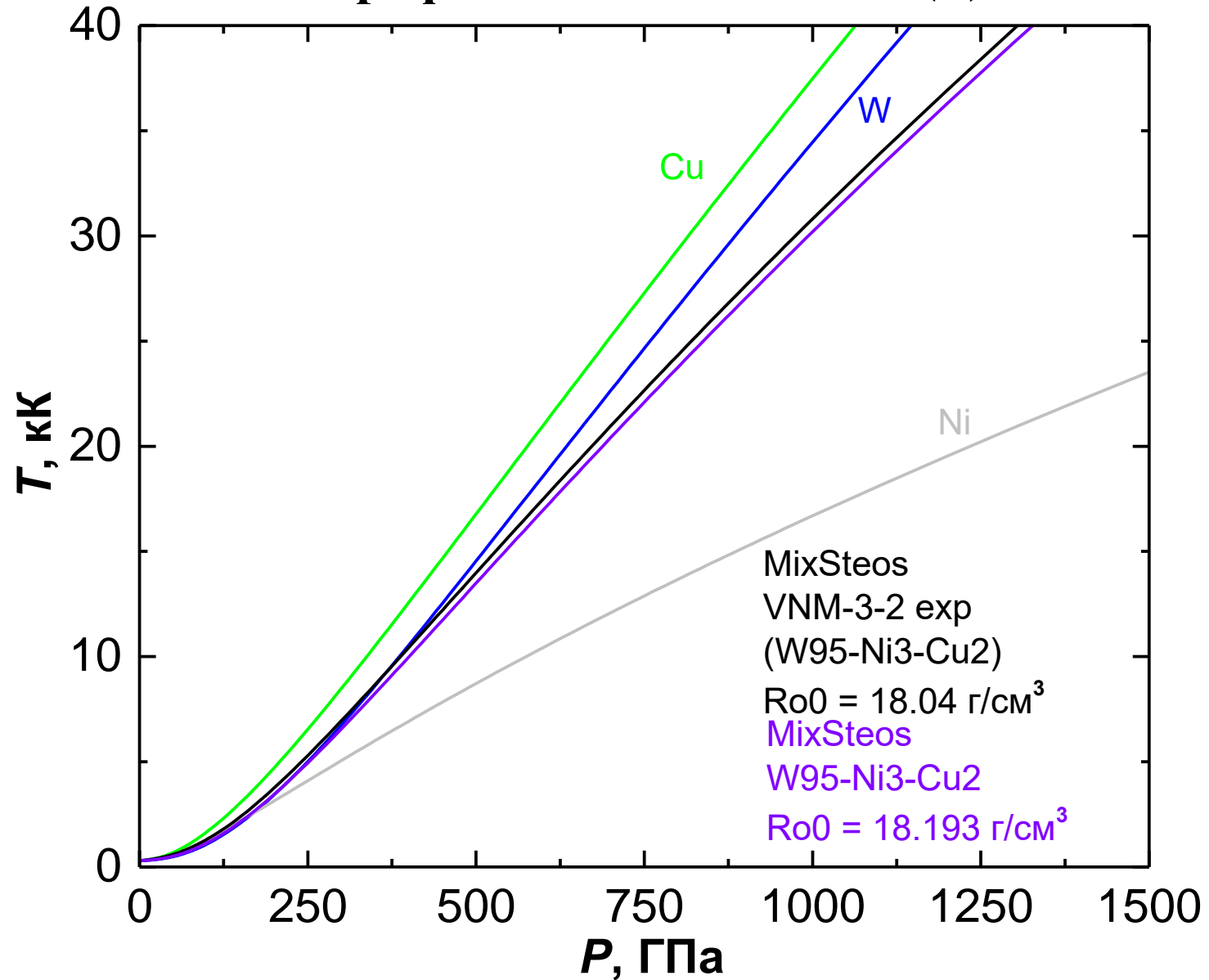
Заключение

- Построена модель уравнения состояния для Cu и W и температурное уравнение состояния STEOS для сплава Cu–W.
- Проведен расчет ударных адиабат при высоких давлениях и температурах для Cu и W с помощью уравнения состояния STEOS. Результаты расчета согласуются с ударно-волновыми экспериментами для сплошных и пористых образцов этих металлов.
- Проведены расчеты ударных адиабат для сплавов W–Cu двумя способами. Первый способ - с помощью уравнения состояния STEOS для сплава Cu–W. Второй способ – на основе метода аддитивности ударных адиабат компонентов Cu и W.
- Не смотря на то, что метод аддитивности не требует выравнивание температур компонентов в сплаве, он имеет хорошее согласие с расчетами на основе температурного уравнения состояния STEOS для сплавов W–Cu с различными массовыми долями компонентов до 5000 ГПа, при использовании одинаковой начальной плотности в обоих методах.
- Результаты расчетов, полученные с помощью уравнения состояния STEOS, согласуются с экспериментальными данными для всех сплавов.



Сплавы вольфрам-никель-медь

Графики зависимостей $T(P)$



Модель уравнения состояния STEOS для компонентов сплава W–Cu

Уравнение состояния для Cu и W задается в виде сумм:

$$E(V, T) = E_c(V) + E_a(V, T) + E_e(V, T),$$

$$P(V, T) = P_c(V) + P_a(V, T) + P_e(V, T),$$

где $E_c(V)$ и $P_c(V)$ — упругие составляющие энергии и давления при $T = 0$; $E_a(V, T)$ и $P_a(V, T)$ — тепловой вклад тяжелых частиц (атомов, ионов); $E_e(V, T)$ и $P_e(V, T)$ — тепловой вклад электронов.

Вывод аддитивности удельного объема

Для системы из двух химически невзаимодействующих материалов: материал M_1 объёмом V_1 и тело M_2 объёмом V_2 . Тогда материал $M = M_1 + M_2$ будет иметь объём $V = V_1 + V_2$. Тогда получаем:

$$V_{\text{уд}} = \frac{V}{m} = \frac{V_1}{m} + \frac{V_2}{m} = \frac{m_1 V_1}{m_1 m} + \frac{m_2 V_2}{m_2 m} = \frac{\alpha_1 V_1}{m_1} + \frac{\alpha_2 V_2}{m_2} = a_1 V_{\text{уд}1} + a_2 V_{\text{уд}2} = \sum_i^N \alpha_i V_i,$$

где V – объем смеси, $V_{\text{уд}}$ – удельный объем смеси, m – масса смеси, $a_i = \frac{m_i}{m}$ – массовая доля i -того компонента смеси.

Согласно принципу аддитивности [1]:

$$V_{1N}(P) = \sum_i^N \alpha_i V_i(P)$$

Ударная адиабата

Взаимосвязь между термодинамическими параметрами ударно-сжатого вещества и его кинематическими характеристиками устанавливается с помощью законов сохранения массы, импульса и энергии [1]:

$$V = V_0 \frac{D - U}{D}, (1)$$

$$P = P_0 + \frac{DU}{V_0}, (2)$$

$$E = E_0 + \frac{1}{2} (P + P_0)(V_0 - V), (3)$$

где V – удельный объем, D – скорость фронта ударной волны (волновая скорость), U – скорость движения вещества за фронтом ударной волны (массовая скорость), P – давление, E – удельная энергия. Индекс «0» относится к начальным значениям этих величин.

Уравнение (3) носит название ударной адиабаты или адиабаты Гюгонио. При заданных P_0 и V_0 уравнение (3) определяет зависимость между P и V . Таким образом, ударная адиабата – совокупность термодинамических состояний вещества, достижимых в результате ударно-волнового сжатия при заданных исходных значениях давления и удельного объема (или плотности).