

**XVII Международная конференция
«ЗАБАБАХИНСКИЕ НАУЧНЫЕ ЧТЕНИЯ»
19–23 мая 2025, Снежинск, Россия**

**МОДЕЛЬ УРАВНЕНИЙ СОСТОЯНИЯ
СПЛАВОВ ТУГОПЛАВКИХ МЕТАЛЛОВ
В ПРОЦЕССАХ ИНТЕНСИВНОГО
МЕХАНИЧЕСКОГО НАГРУЖЕНИЯ**

Середкин Н.Н.®, Хищенко К.В.

**Объединенный институт высоких температур РАН, Москва
®e-mail: nikser12@yandex.ru**

Цель работы

- ✓ Построение уравнений состояния для смесей разнообразных компонентов в широкой области давлений и температур.

Задачи данной работы

- ❑ Построение уравнений состояния для компонентов сплавов тугоплавких металлов (рения, вольфрама и других веществ) при высоких давлениях и температурах.
- ❑ Построение уравнения состояния смесей на основе уравнений состояния компонентов с учетом их массовых долей в предположении равенства давлений и температур в компонентах.
- ❑ Расчет ударных адиабат исследуемых смесей двумя методами:
 1. на основе уравнения состояния смеси;
 2. в аддитивном приближении — объем ударно-сжатой смеси предполагается равным сумме объемов ударно-сжатых компонентов при заданном давлении (смесевой метод).
- ❑ Сравнение результатов расчетов для смесей, полученных двумя методами друг с другом, а также с имеющимися экспериментальными данными по ударному сжатию при высоких давлениях и температурах.

Модель уравнения состояния STEOS для компонентов смесей

При построении модели полуэмпирического уравнения состояния вещества был выбран термодинамический потенциал — свободная энергия Гельмгольца в своих естественных переменных (удельный объем и температура) — $F(V, T)$. Из него были определены функциональные зависимости для внутренней энергии $E(V, T) = F(V, T) + TS(V, T) = F(V, T) - T(\partial F/\partial T)_V$ и давления $P(V, T) = -(\partial F/\partial V)_T$ [1].

Таким образом, калорическое и термическое уравнения состояния компонентов задаются в виде сумм холодных и тепловых составляющих [2]:

$$\begin{aligned} E(V, T) &= E_c(V) + E_a(V, T) + E_e(V, T), \\ P(V, T) &= P_c(V) + P_a(V, T) + P_e(V, T), \end{aligned}$$

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

1) И.П. Базаров. Термодинамика. — М.: Высшая школа. 1991. 376 с.

2) Я.Б. Зельдович, Ю.П. Райзер. Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений — М.: Физматлит, 2008.

Модель уравнения состояния STEOS для компонентов смесей

Холодная часть:

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

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

Тепловой вклад атомов:

$$E_a(V, T) = \frac{3}{2}RT \frac{2\theta^2 + T_a\sigma^{\frac{2}{3}}T}{\theta^2 + T_a\sigma^{\frac{2}{3}}T}, \quad P_a(V, T) = \frac{1}{V}RT \frac{3\theta^2\gamma + T_a\sigma^{\frac{2}{3}}T}{\theta^2 + T_a\sigma^{\frac{2}{3}}T}, \quad \gamma(V) = \frac{2}{3} + \left(\gamma_0 - \frac{2}{3} \right) \frac{\delta_n + \ln \sigma_m}{\delta_n + \ln \frac{\sigma}{\sigma_m}},$$
$$\theta(V) = \theta_0 \sigma^{\frac{2}{3}} \exp \left[\left(\gamma_0 - \frac{2}{3} \right) \frac{\delta_n + \ln \sigma_m}{\delta_n^{\frac{1}{2}}} \left(\operatorname{arctg} \frac{\ln \sigma - \ln \sigma_m}{\delta_n^{\frac{1}{2}}} + \operatorname{arctg} \frac{\ln \sigma_m}{\delta_n^{\frac{1}{2}}} \right) \right],$$

где $\sigma = V_0/V$, T — температура, R — удельная газовая постоянная, V_0 , T_a , θ_0 , γ_0 , δ_n , σ_m — параметры.

Тепловой вклад электронов:

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

где β_{e0} и γ_{e0} — параметры.

Расчет ударных адиабат с использованием уравнения состояния вещества

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

$$V = V_0 \frac{D - U}{D}, \quad P = P_0 + \frac{DU}{V_0}, \quad E = E_0 + \frac{1}{2}(P + P_0)(V_{00} - V),$$

где D — скорость фронта ударной волны (волновая скорость), U — скорость вещества за фронтом ударной волны (массовая скорость) E, P, V — характеристики состояния образца за фронтом ударной волны; E_0, P_0 и V_{00} — перед ним.

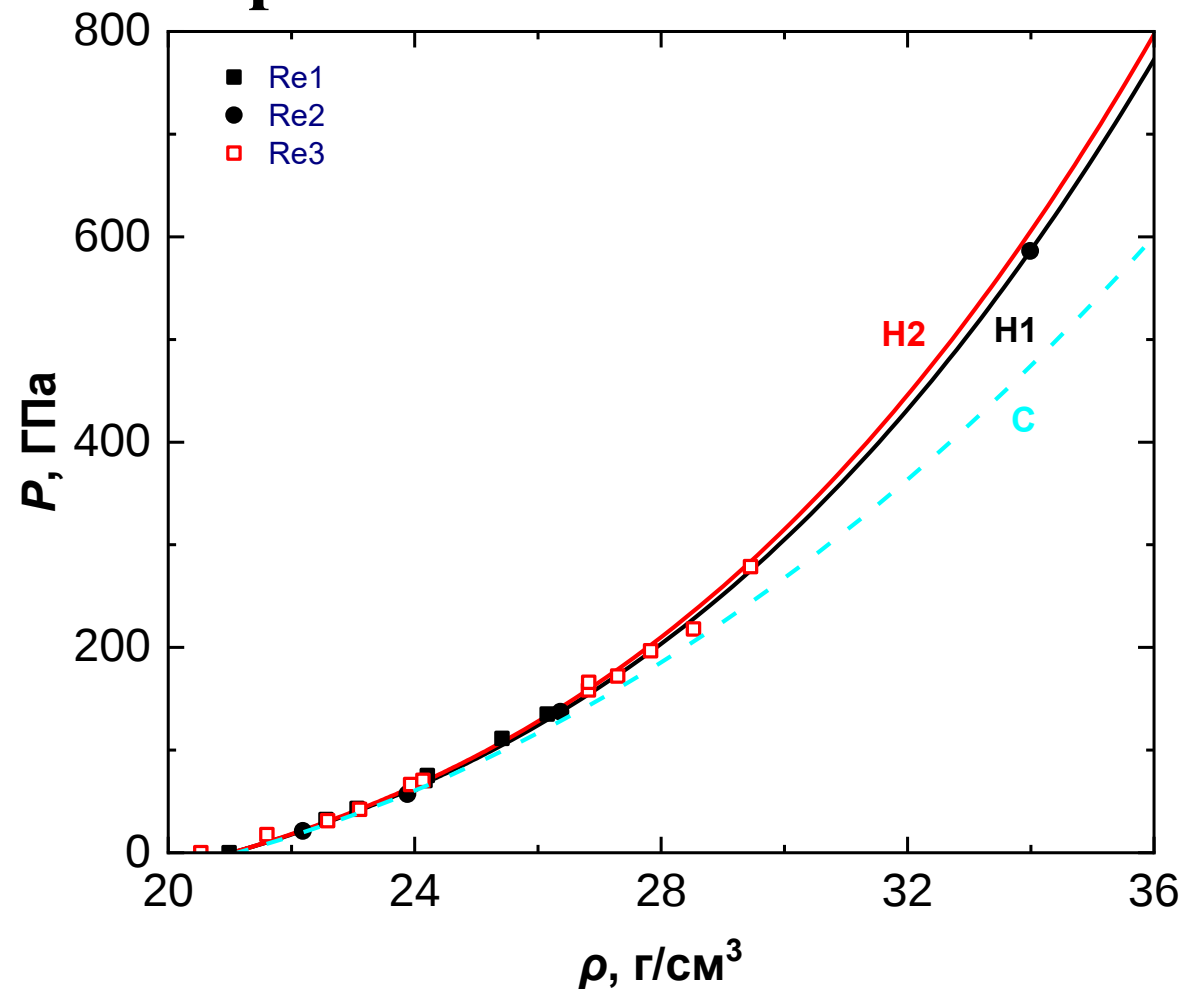
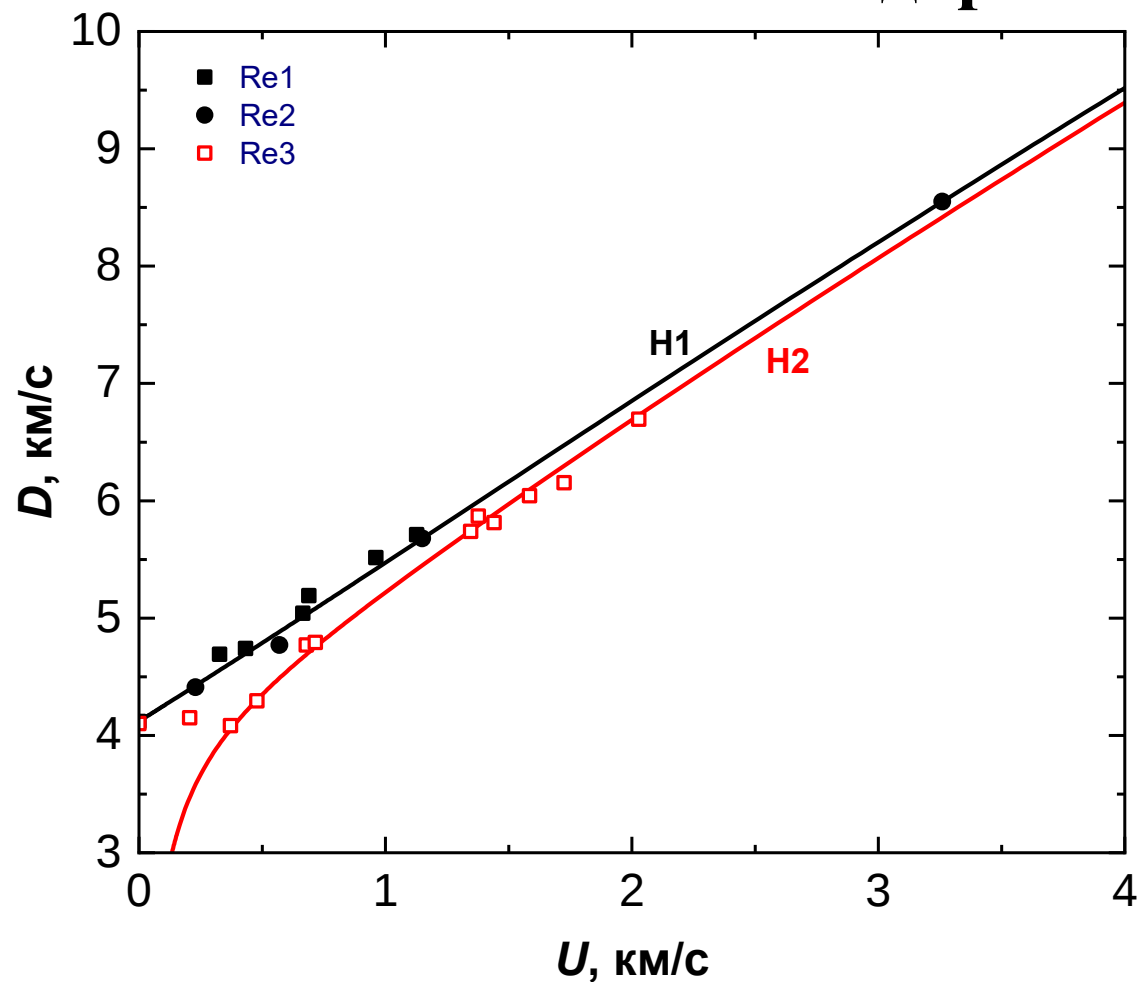
Ударные адиабаты компонентов рассчитывались путем решения системы калорического и термического уравнений состояния по модели STEOS, а также закона сохранения энергии:

$$\begin{cases} E = E(V, T), \\ P = P(V, T), \\ E = E_0 + \frac{1}{2}(P + P_0)(V_{00} - V). \end{cases}$$

Массовая и волновая скорости вещества находятся из законов сохранения массы и импульса следующим образом:

$$U = \sqrt{(P - P_0)(V_{00} - V)}, \\ D = V_{00} \sqrt{(P - P_0)/(V_{00} - V)}.$$

Ударные адиабаты рения

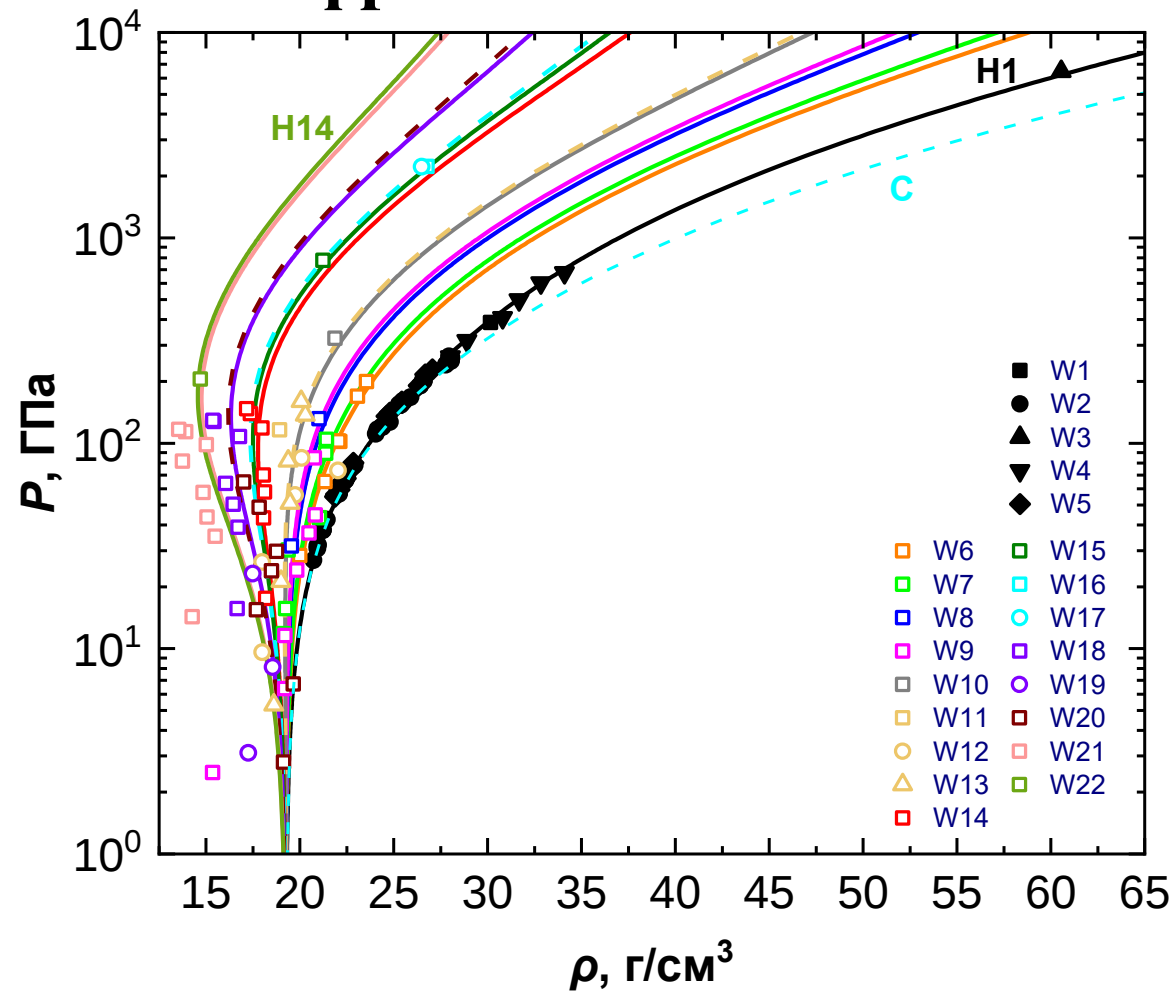
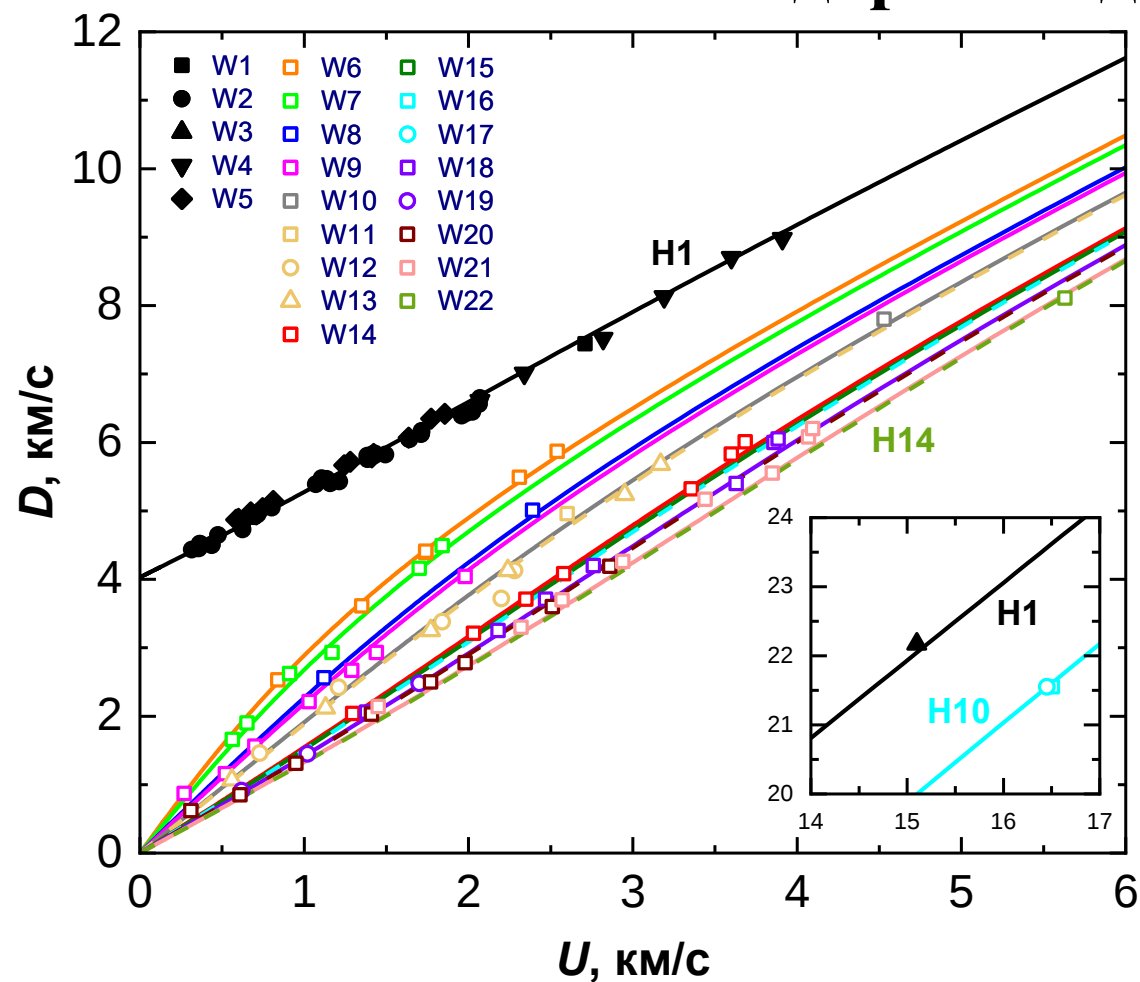


Линии — результаты расчета ударных адиабат по уравнению состояния STEOS для рения с начальными плотностями образцов ρ_{00} : 21.030 и 20.530 г/см³ (H1 и H2), а также холодной кривой (C — изотермическое сжатие сплошных образцов при $T = 0$). Маркеры — экспериментальные данные для сплошных (Re1 — [1], Re2 — [2]) и пористых (Re3 — [1]) образцов рения.

1) Marsh S. P. LASL Shock Hugoniot Data. — Berkeley, CA: Univ. California Press, 1980.

2) Al'tshuler L. V. et al. Shock adiabatic curves of metals: New data, statistical analysis, and general laws // J. Appl. Mech. Techn. Phys. 1981. Vol. 22. No. 2. P. 145-169.

Ударные адиабаты вольфрама

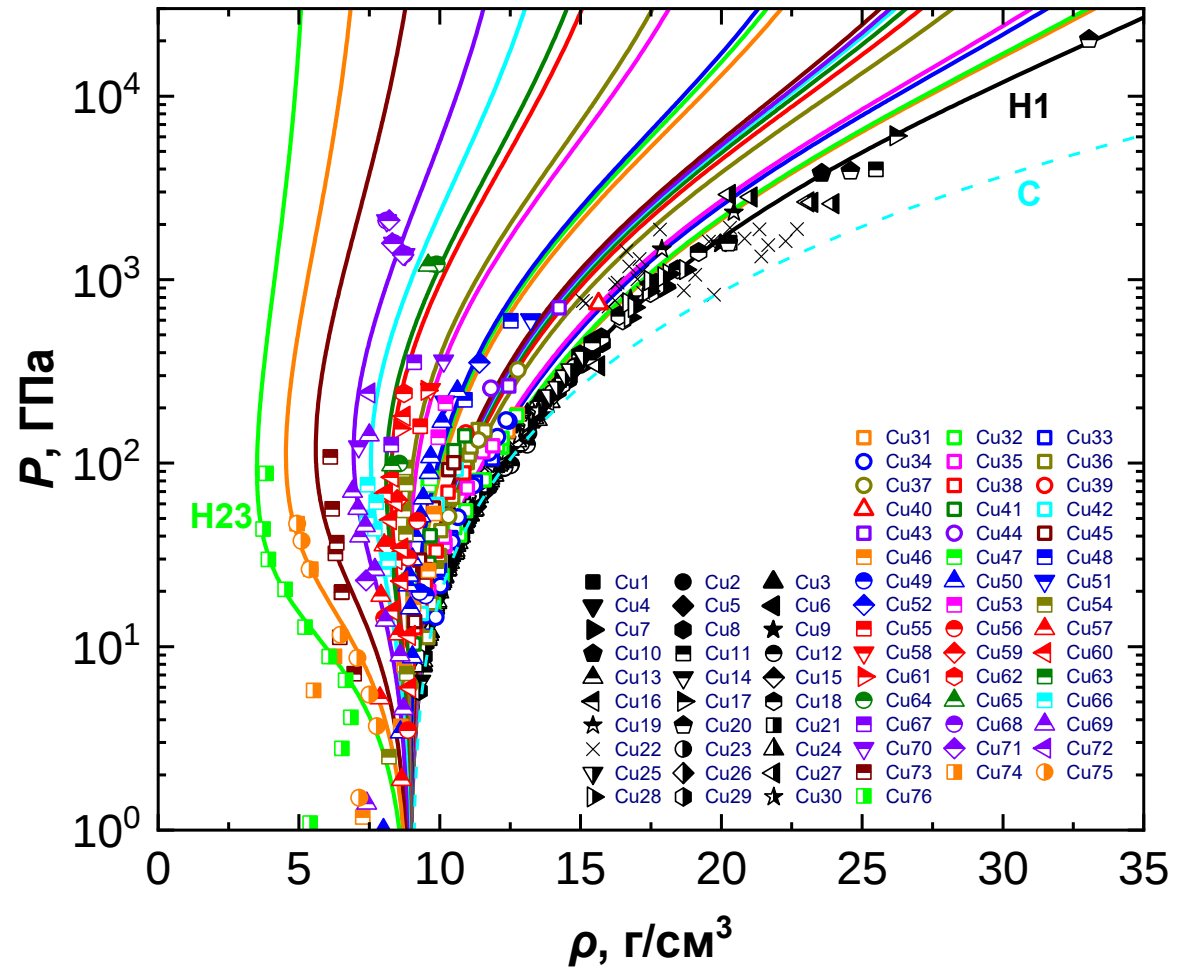
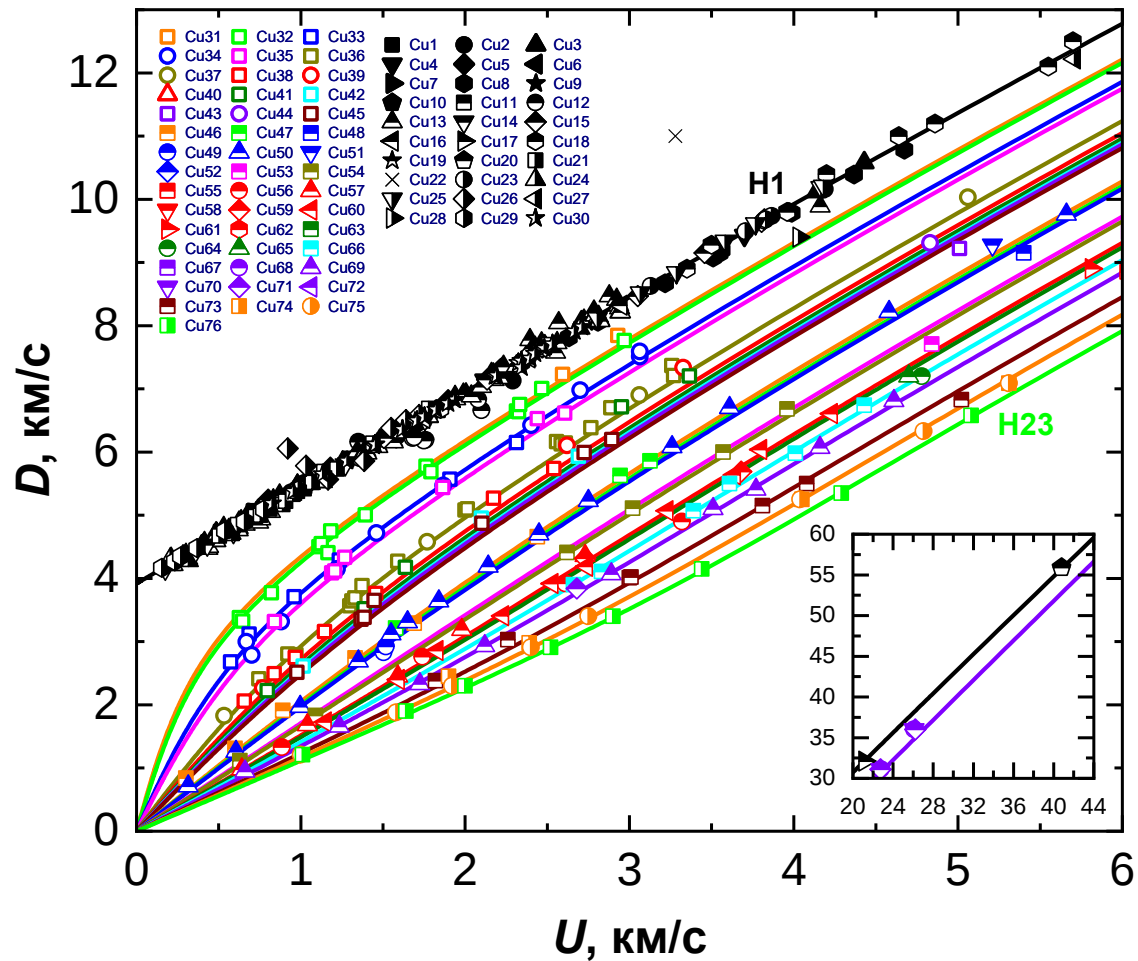


Линии — результаты расчета ударных адиабат по уравнению состояния STEOS для вольфрама с начальными плотностями образцов ρ_{00} : 19.250, 13.360, 12.640, 11.000, 10.590, 9.171, 9.000, 6.640, 6.389, 6.270, 5.500, 5.400, 4.600, 4.500 г/см³ (H1–H14), а также холодной кривой (C — изотермическое сжатие сплошных образцов при $T=0$). Маркеры — экспериментальные данные для сплошных (W1 — [1], W2 — [2], W3 — [3], W4 — [4], W5 — [5]) и пористых образцов (W6 — [6]; W7 — [7]; W8 — [8]; W9 — [9]; W10,11 — [8]; W12 — [10]; W13,14 — [6]; W15,16 — [11]; W17 — [12]; W18 — [6]; W19 — [13]; W20 — [9]; W21 — [6]; W22 — [8]) вольфрама.

Экспериментальные данные по ударному сжатию W

- 1) Jones A.H., Isbell W.M., Maiden C.J. // J. Appl. Phys. 1966. Vol. 37. № 9. P. 3493–3499.
- 2) Marsh S.P. LASL Shock Hugoniot Data. – Berkeley: Univ. California Press, 1980.
- 3) Ragan III C.E. // Phys. Rev. Ser. A. 1982. Vol. 25. № 6. P. 3360–3375.
- 4) Hixson R.S., Fritz J. N. // J. Appl. Mech. Techn. Phys. 1992. Vol. 71. № 4. P. 1721–1728.
- 5) Mashimo T. et al. // J. Appl. Phys. 2016. Vol. 119. № 3. P. 035904.
- 6) Trunin R.F. et al. // Sov. Phys. JETP. 1989. Vol. 69. № 3. P. 580–588.
- 7) Boade R.R. // J. Appl. Phys. 1969. Vol. 40. № 9. P. 3781–3785.
- 8) Krupnikov K.K., Brazhnik M.I., Krupnikova V.P. // Sov. Phys. JETP. 1962. Vol. 15. № 3. P. 470–476.
- 9) Bakanova A.A., Dudoladov I.P., Sutulov Y.N. // J. Appl. Mech. Techn. Phys. 1974. Vol. 15. № 2. P. 241–245.
- 10) Alekseev Yu.L., Ratnikov V.P., Rybakov A.P. // J. Appl. Mech. Techn. Phys. 1971. Vol. 12. № 2. P. 257–262.
- 11) Trunin R.F. et al. // Sov. Phys. JETP. 1989. Vol. 68. № 2. P. 356–361.
- 12) Trunin R.F. // Phys. Usp. 1994. Vol. 37. № 11. P. 1123–1146.
- 13) Трунин Р.Ф. и др. Экспериментальные данные по ударно-волновому сжатию и адиабатическому расширению конденсированных веществ. — Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2006.

Ударные адиабаты меди



Линии — результаты расчета ударных адиабат по уравнению состояния STEOS для меди с различными начальными плотностями образцов ρ_0 : 8.930, 7.982, 7.897, 7.390, 7.203, 6.325, 6.000, 5.846, 5.738, 5.688, 5.589, 4.670, 4.541, 4.465, 3.705, 3.570, 3.000, 2.880, 2.551, 2.230, 1.639, 1.240, 0.893 г/см³ (от H1 до H23), а также холодной кривой (C — изотермическое сжатие сплошных образцов при $T=0$). Маркеры — экспериментальные данные для сплошных (Cu1—[1], ..., Cu30—[30]) и пористых (Cu31,32—[13]; Cu33—[31]; Cu34–36—[13]; Cu37—[32]; Cu38—[31]; Cu39—[13]; Cu40—[33]; Cu41,42—[13]; Cu43—[6]; Cu44—[33]; Cu45—[13]; Cu46—[34]; Cu47—[13]; Cu48—[6]; Cu49—[13]; Cu50—[32]; Cu51—[33]; Cu52—[35]; Cu53—[36]; Cu54—[32]; Cu55—[6]; Cu56—[37]; Cu57—[34]; Cu58—[38]; Cu59—[36]; Cu60—[32]; Cu61—[33]; Cu62—[20]; Cu63—[38]; Cu64—[33]; Cu65—[20]; Cu66—[32]; Cu67—[6]; Cu68—[38]; Cu69—[32]; Cu70—[33]; Cu71—[20]; Cu72—[35]; Cu73,74—[32]; Cu75,76—[39]) образцов меди.

Экспериментальные данные по ударному сжатию Си

- 1) Walsh J.M. et al. // Phys. Rev. 1957. Vol. 108. № 2. P. 196–216.
- 2) Al'tshuler L.V., Krupnikov K.K., Brazhnik M.I. // Sov. Phys. JETP. 1958. Vol. 34. № 7. P. 874–885.
- 3) Al'tshuler L.V. et al. // Sov. Phys. JETP. 1960. Vol. 11. № 3. P. 573–579.
- 4) Al'tshuler L.V. et al. // Sov. Phys. JETP. 1960. Vol. 11. № 4. P. 766–775.
- 5) McQueen R.G., Marsh S.P. // J. Appl. Phys. 1960. Vol. 31. № 7. P. 1253–1269.
- 6) Kormer S.B. et al. // Sov. Phys. JETP. 1962. Vol. 15. № 3. P. 477–488.
- 7) Al'tshuler L.V., Bakanova A.A., Trunin R.F. // Sov. Phys. JETP. 1962. Vol. 15. № 1. P. 65–75.
- 8) Isbell W.M., Jones A.H., Shipman F.H. — Warren, MI: General Motors Corp., Manufact. Devel. Mat. Struct. Lab. Rep. №MSL–68–13, 1968.
- 9) Trunin R.F. et al. // Sov Phys JETP. 1969. Vol. 29. № 4. P. 630–631.
- 10) Trunin R.F. et al. // Sov. Phys. JETP. 1972. Vol. 35. № 3. P. 550–552.
- 11) Al'tshuler L.V. et al. // Sov. Phys. JETP. 1977. Vol. 45. № 1. P. 167–171.
- 12) Van Thiel M. Compendium of shock wave data. — Livermore, CA: Lawrence Livermore Lab., Rep. UCRL–50108, 1977. Vol 1. P. 130.
- 13) Marsh S.P. LASL Shock Hugoniot Data. — Berkeley: Univ. California Press, 1980.
- 14) Al'tshuler L.V. et al. // J. Appl. Mech. Techn. Phys. 1981. Vol. 22. № 2. P. 145–169.
- 15) Mitchell A.C., Nellis W.J. // J. Appl. Phys. 1981. Vol. 52. № 5. P. 3363–3374.
- 16) Zhernokletov M.V., Zubarev V.N., Sutulov Y.N. // Zh. Prikl. Mekh. Tekhn. Fiz. 1984. Vol. 1. P. 119–123.
- 17) Ragan III C.E. // Phys. Rev. Ser. A. 1984. Vol. 29. № 3. P. 1391–1402.
- 18) Glushak B.L. et al. // Zh. Eksp. Teor. Fiz. 1989. Vol. 96. № 4. P. 1301–1318.
- 19) Mitchell A.C. et al. // J. Appl. Mech. Techn. Phys. 1991. Vol. 69. № 5. P. 2981–2986.
- 20) Trunin R.F. // Phys. Usp. 1994. Vol. 37. № 11. P. 1123–1146.
- 21) Zhugin Y.N. et al. // Fiz. Zemli. 1994. № 10. P. 16–22. В интерпретации Трунина 2006.
- 22) Rothman S.D. et al. // Phys. Plasmas. 2002. Vol. 9. № 5. P. 1721–1733.
- 23) Nellis W.J., Mitchell A.C., Young D.A. // J. Appl. Phys. 2003. Vol. 93. № 1. P. 304–310.
- 24) Трунин Р.Ф. и др. Экспериментальные данные по ударно–волновому сжатию и адиабатическому расширению конденсированных веществ. — Саров: РФЯЦ–ВНИИЭФ, 2006.
- 25) Yokoo M. et al. // Int. J. Impact Eng. 2008. Vol. 35. № 12. P. 1878–1883.
- 26) Brown J.L. et al. // J. Appl. Phys. 2011. Vol. 109. № 9. P. 093520.
- 27) Furnish M. D., Haill T. A. Copper Hugoniot measurements to 2.8 TPa on Z. — Albuquerque, NM: Sandia National Lab, 2018. Rep. № SAND–2018–3901.
- 28) McCoy C.A., Knudson M.D., Root S. // Phys. Rev. B. 2017. Vol. 96. № 17. P. 174109.
- 29) Zhang J. et al. // AIP Advances. 2023. Vol. 13. № 4. P. 045202.
- 30) Hawreliak J. A. et al. Sound speed determination in copper shock compressed to 190 GPa // J. Appl. Phys. 2024. Vol. 136. № 16. P. 165902.
- 31) Boade R.R. // J. Appl. Phys. 1968. Vol. 39. № 12. P. 5693–5702.
- 32) Trunin R.F. et al. // Sov. Phys. JETP. 1989. Vol. 69. № 3. P. 580–588.
- 33) Trunin R. F. et al. // Sov. Phys. JETP. 1989. Vol. 68. № 2. P. 356–361.
- 34) Bakanova A.A., Dudoladov I.P., Sutulov Y.N. // J. Appl. Mech. Techn. Phys. 1974. Vol. 15. № 2. P. 241–245.
- 35) Trunin R.F., Panov N.V. // High Temperature. 2000. Vol. 38. P. 728–731.
- 36) Al'tshuler L.V. et al. // Sov. Phys. JETP. 1980. Vol. 51. P. 373–383.
- 37) Alekseev Yu.L., Ratnikov V.P., Rybakov A.P. // J. Appl. Mech. Techn. Phys. 1971. Vol. 12. № 2. P. 257–262.
- 38) Зубарев В.Н. и др. // Детонация. Черногловка: ОИХФ АН СССР, 1978. С. 61–65.
- 39) Gryaznov V.K. et al. // JETP. 1998. Vol. 87. № 4. P. 678–690.

Модель термодинамики для смесей

Уравнение состояния смеси задается из предположения о равенстве температур (T) и давлений (P) в его компонентах. В таком случае характеристической функцией [1] параметров T и P является термодинамический потенциал G — удельная энергия Гиббса:

$$G_{1N}(P, T) = \sum_{i=1}^N \alpha_i G_i(P, T),$$

где G_{1N} — удельная энергия Гиббса смеси, G_i — удельная энергия Гиббса i -того компонента, E_{1N} — удельная внутренняя энергия смеси; α_i — массовая доля i -того компонента.

Имея характеристическую функцию можно определить и остальные термодинамические параметры системы, например, удельную энтропию как $S = -(\partial G / \partial T)_P$, удельный объем как $V = (\partial G / \partial P)_T$ и удельную внутреннюю энергию как $E = G + TS - PV$.

Модель термодинамики для смесей

Уравнение состояния смеси задается в виде сумм удельных объемов и удельных энергий компонентов смеси при заданных давлении и температуре:

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

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

Для расчета ударных адиабат также используется уравнение Гюгонио:

$$E_{1N} = E_0 + \frac{1}{2}(P + P_0)(V_{00} - V_{1N}).$$

Аддитивное приближение для расчета ударной адиабаты смеси (смесевой метод)

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

$$V = V_0 \frac{D - U}{D}, \quad P = P_0 + \frac{DU}{V_0}, \quad E = E_0 + \frac{1}{2}(P + P_0)(V_0 - V).$$

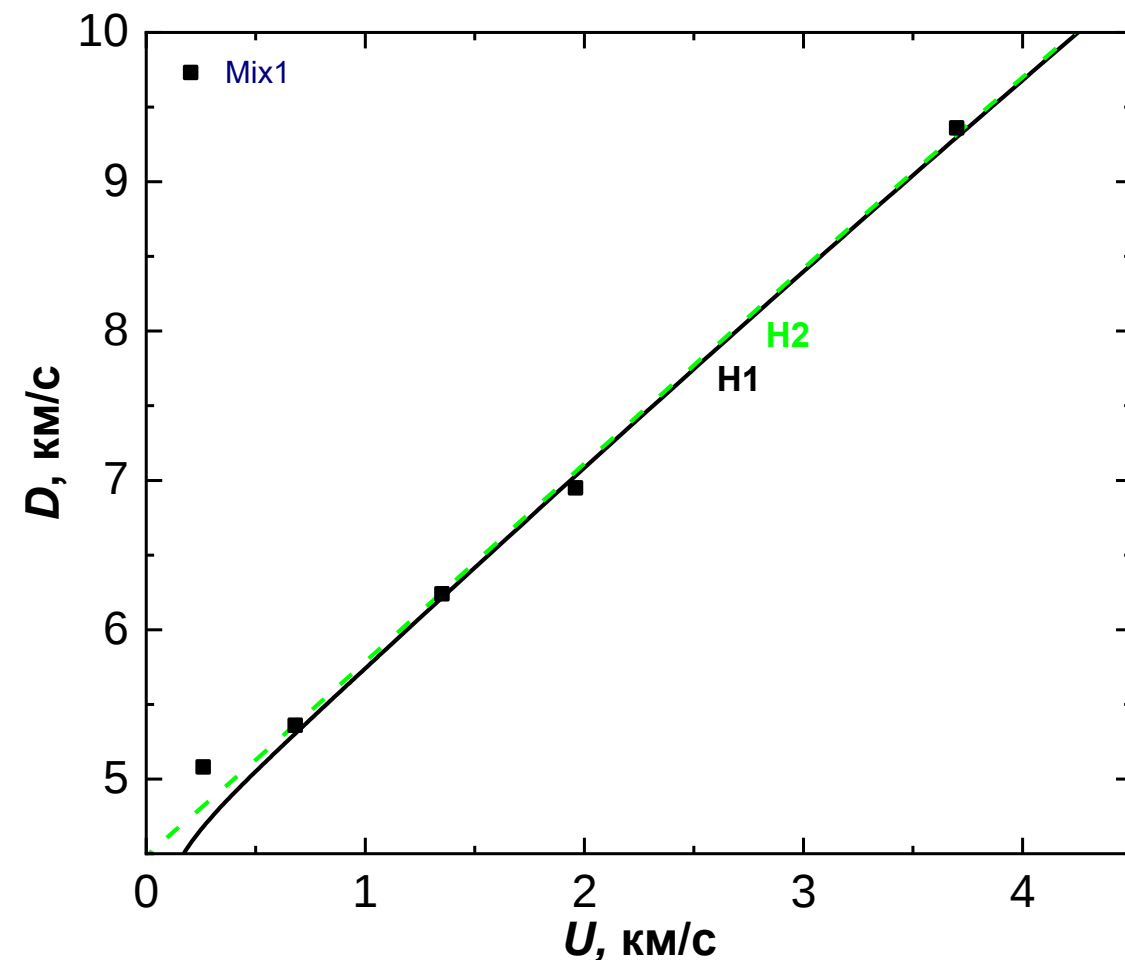
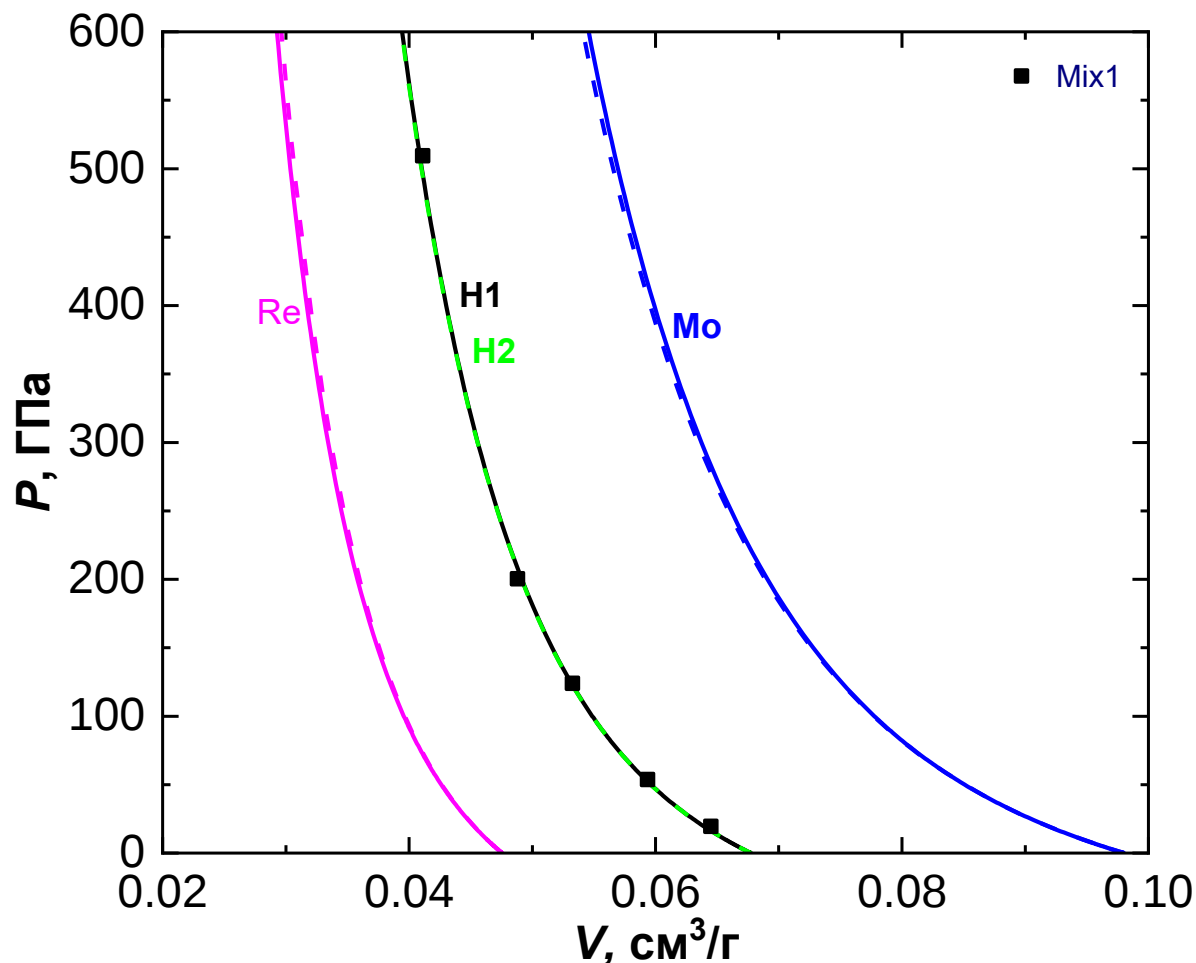
Из аддитивного приближения [1, 2] следует, что удельный объем ударно-сжатой смеси (V_{1N}) при заданном давлении (P) предполагается равным сумме удельных объемов ($V_1, \dots, V_N$) ударно-сжатых компонентов этой смеси с учетом их массовых долей ($\alpha_1, \dots, \alpha_N$) при том же давлении (P). Это условие выражается соотношением:

$$V_{1N}(P) = \sum_{i=1}^N \alpha_i V_i(P).$$

1) Дремин А.Н., Карпухин И.А. Метод определения ударных адиабат дисперсных веществ // ПМТФ. 1960. № 3. С. 184.

2) Алексеев Ю.Ф., Альтиулер Л.В., Крупникова В.П. Ударное сжатие двухкомпонентных парафино-вольфрамовых смесей // ПМТФ. 1971. № 4. С. 152.

Ударные адиабаты смеси Re–Mo(40 мас.%) и ее компонентов



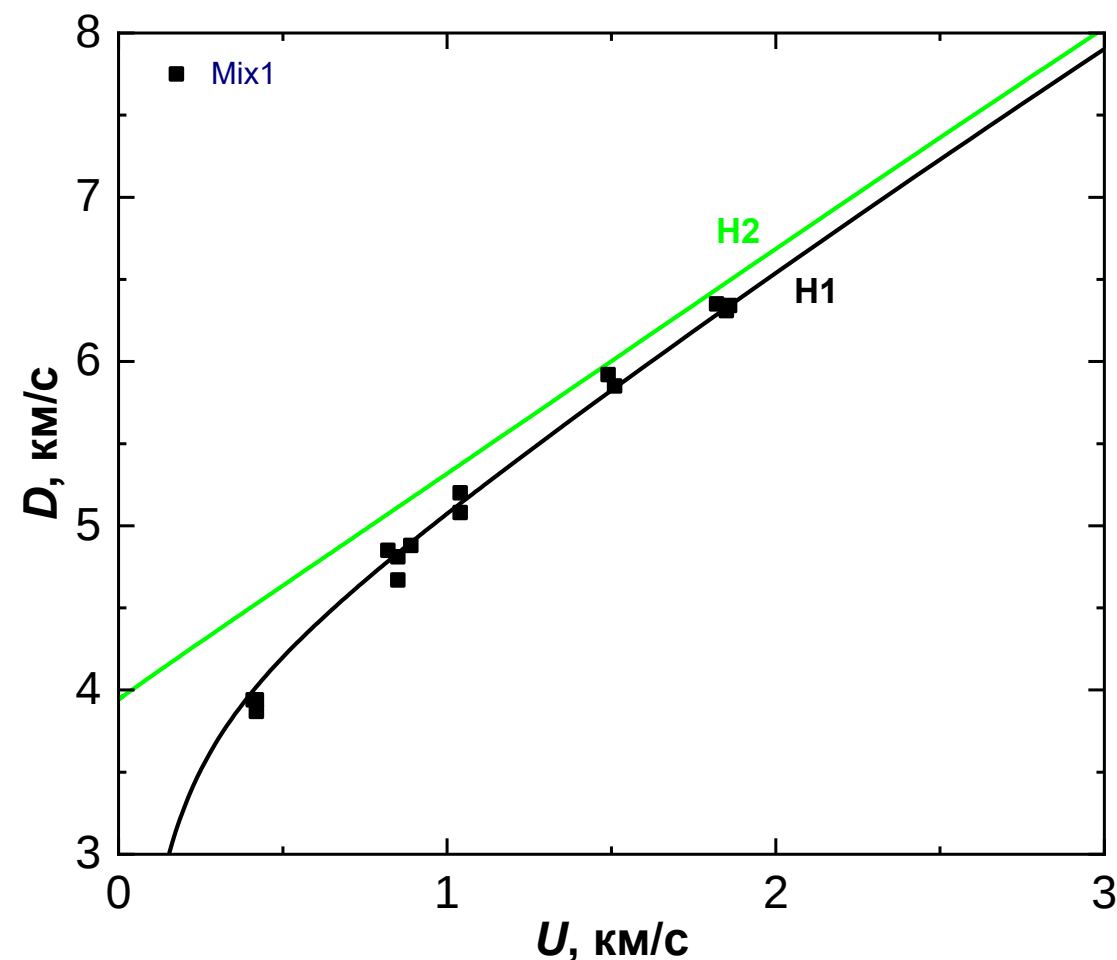
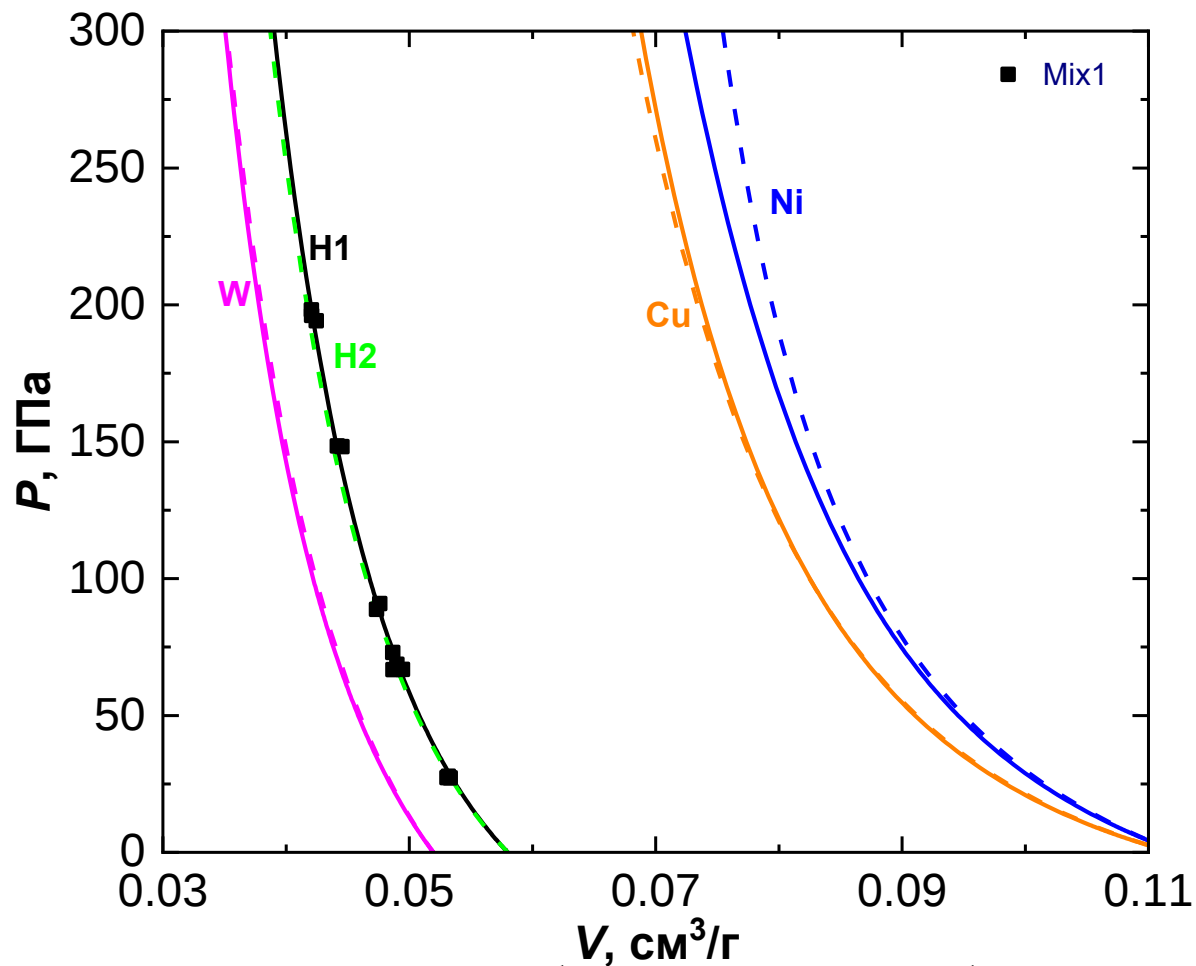
Линии — расчет ударных адиабат смеси двумя способами:

- по уравнению состояния смеси Re–Mo(40 мас.%) с $\rho_{00} = 14.710$ (H1),
- на основе принципа аддитивности удельных объемов на ударных адиабатах компонентов для смеси Re–Mo(40 мас.%) с расчетной начальной плотностью $\rho_{00} = 14.761$ (H2);

а также компонентов по модели STEOS (Re — рений с $\rho_{00} = 21.030$ г/см³; Mo — молибден с $\rho_{00} = 10.200$).

Маркеры — экспериментальные данные для образцов Re–Mo(40 мас.%) (Mix — [1]).

Ударные адиабаты смеси W–Ni(7.5)–Cu(2.5 мас.%) и ее компонентов



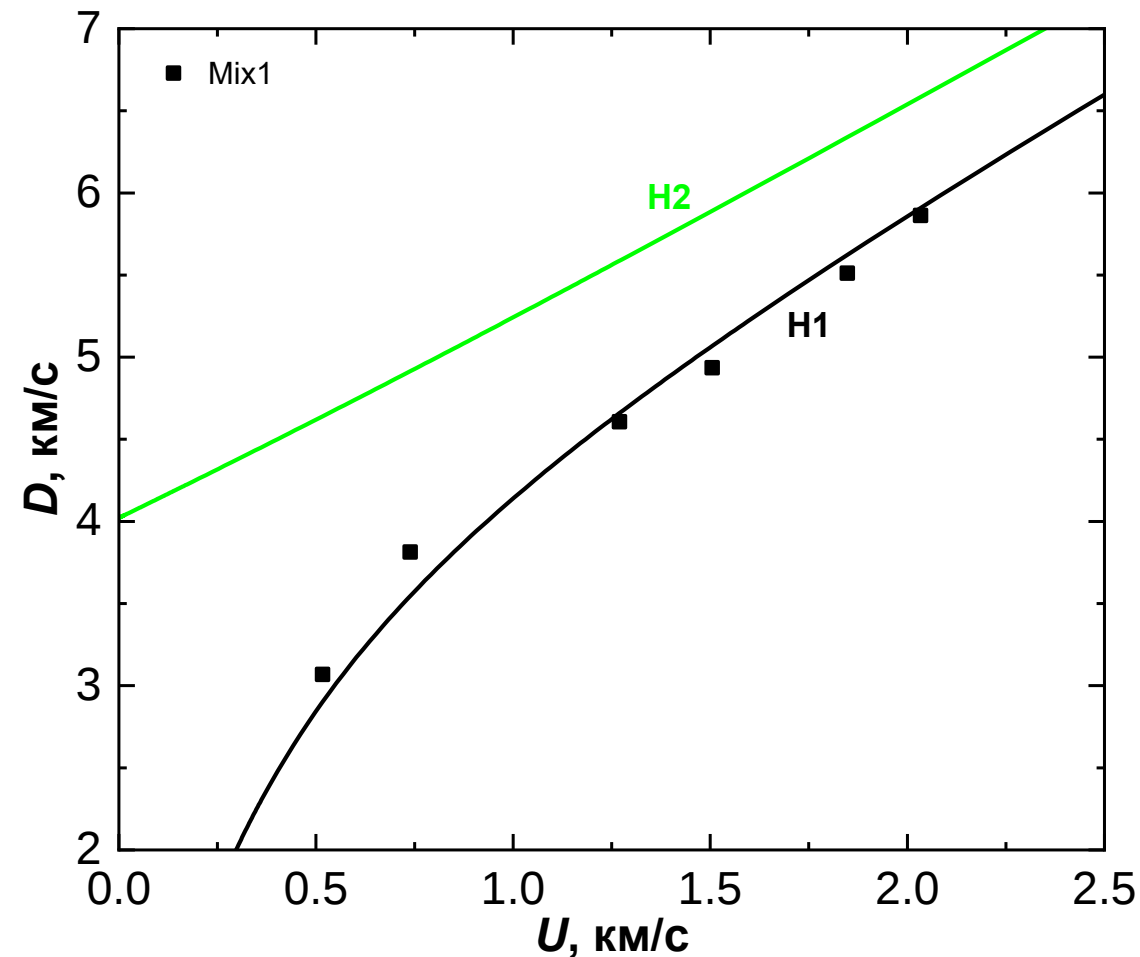
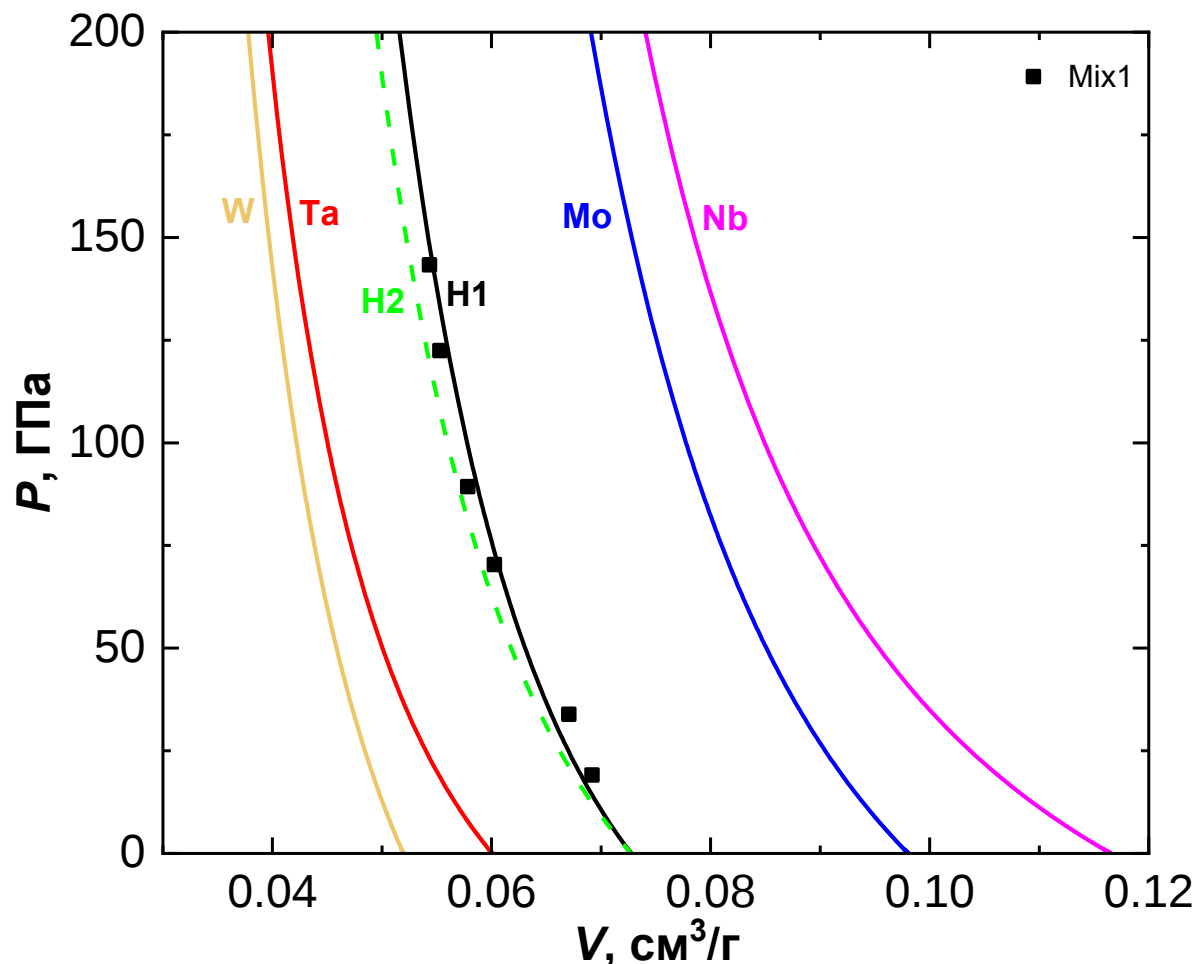
Линии — расчет ударных адиабат смеси двумя способами:

- по уравнению состояния смеси W–Ni(7.5)–Cu(2.5 мас.%) с $\rho_{00} = 16.800$ (H1),
- на основе принципа аддитивности удельных объемов на ударных адиабатах компонентов для смеси W–Ni(7.5)–Cu(2.5 мас.%) с расчетной начальной плотностью $\rho_{00} = 17.245$ (H2);

а также компонентов по модели STEOS (W — вольфрам с $\rho_{00} = 19.250$ $\text{г}/\text{см}^3$; Ni — никель с $\rho_{00} = 8.890$; Cu — медь с $\rho_{00} = 8.930$).

Маркеры — экспериментальные данные для образцов W–Ni(7.5)–Cu(2.5 мас.%) (Mix1 — [1]).

Ударные адиабаты смеси Nb–Mo(17.54)–Ta(33.71)–W(33.30 мас.%) и ее компонентов



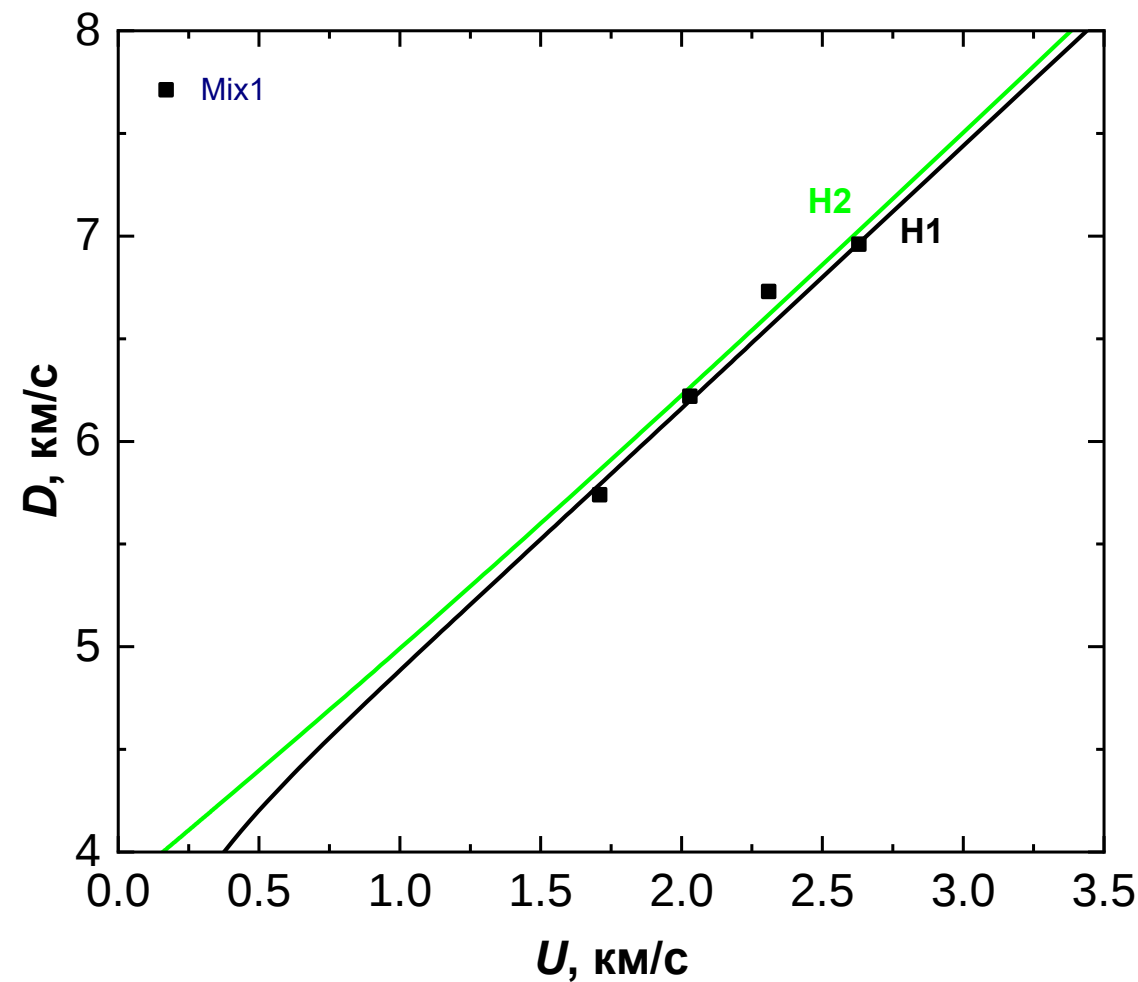
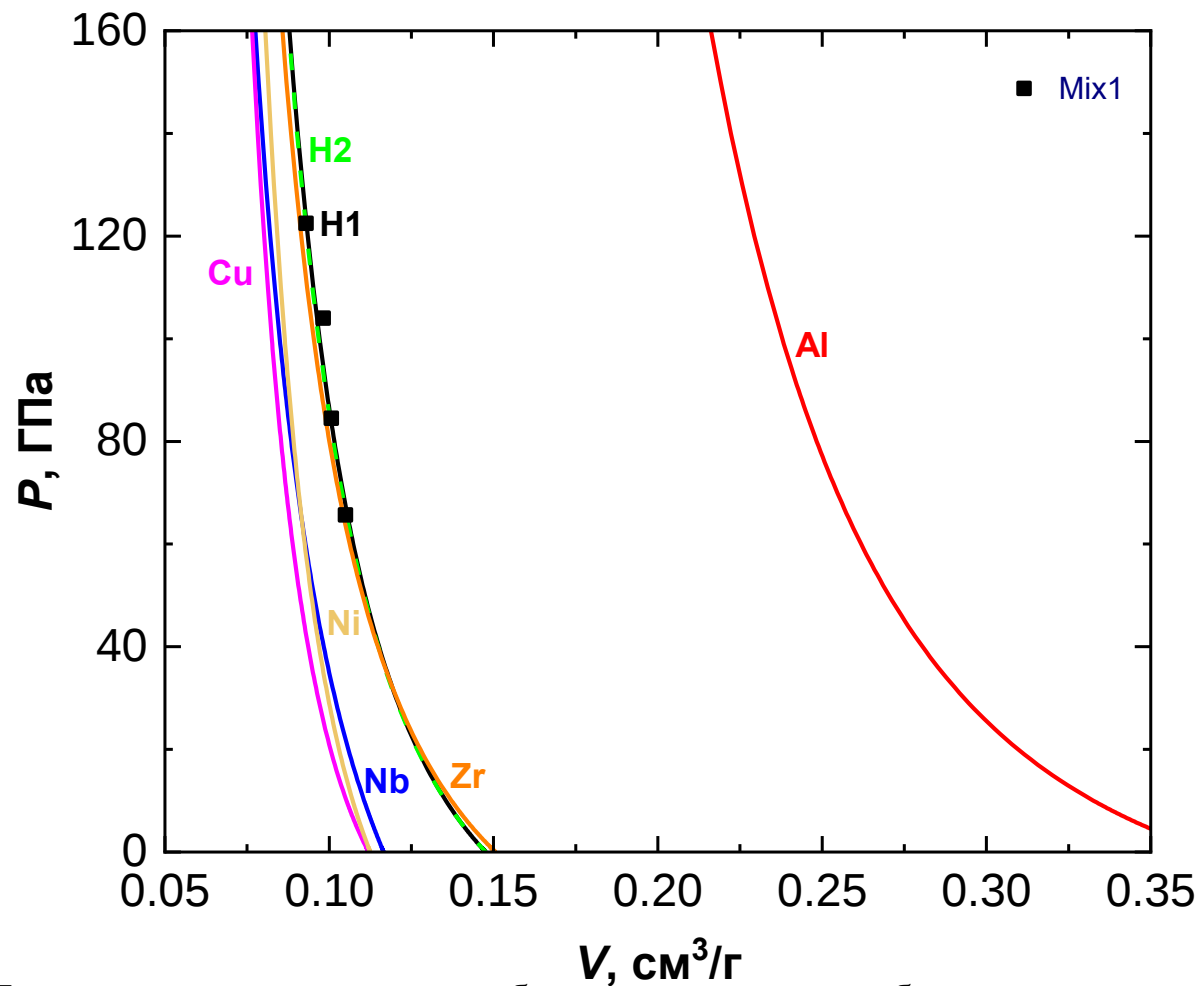
Линии — расчет ударных адиабат смеси двумя способами:

- по уравнению состояния смеси Nb–Mo(17.54)–Ta(33.71)–W(33.30 мас.%) с $\rho_{00} = 12.020$ (H1),
- на основе принципа аддитивности удельных объемов на ударных адиабатах компонентов для смеси Nb–Mo(17.54)–Ta(33.71)–W(33.30 мас.%) с расчетной начальной плотностью $\rho_{00} = 13.747$ (H2);

а также компонентов по модели STEOS (W — вольфрам с $\rho_{00} = 19.250$ г/см³; Ta — тантал с $\rho_{00} = 16.650$; Mo — молибден с $\rho_{00} = 10.200$; Nb — ниобий с $\rho_{00} = 8.580$).

Маркеры — экспериментальные данные для образцов W–Ni(7.5)–Cu(2.5 мас.%) (Mix1 — [1]).

Ударные адибаты смеси Zr–Nb(6.07 мас.%)–Cu(12.79%)–Ni(9.66%)–Al(3.53%) и ее компонентов



Линии — расчет ударных адиабат смеси двумя способами:

- по уравнению состояния смеси Zr–Nb–Cu–Ni–Al с $\rho_{00} = 6.690$ (H1),
- на основе принципа аддитивности удельных объемов на ударных адиабатах компонентов для смеси Zr–Nb–Cu–Ni–Al с расчетной начальной плотностью $\rho_{00} = 6.774$ (H2);

а также компонентов по модели STEOS (для сплошных образцов) (Zr — цирконий; Ti — титан; Ni — никель; Cu — медь; Al — алюминий).

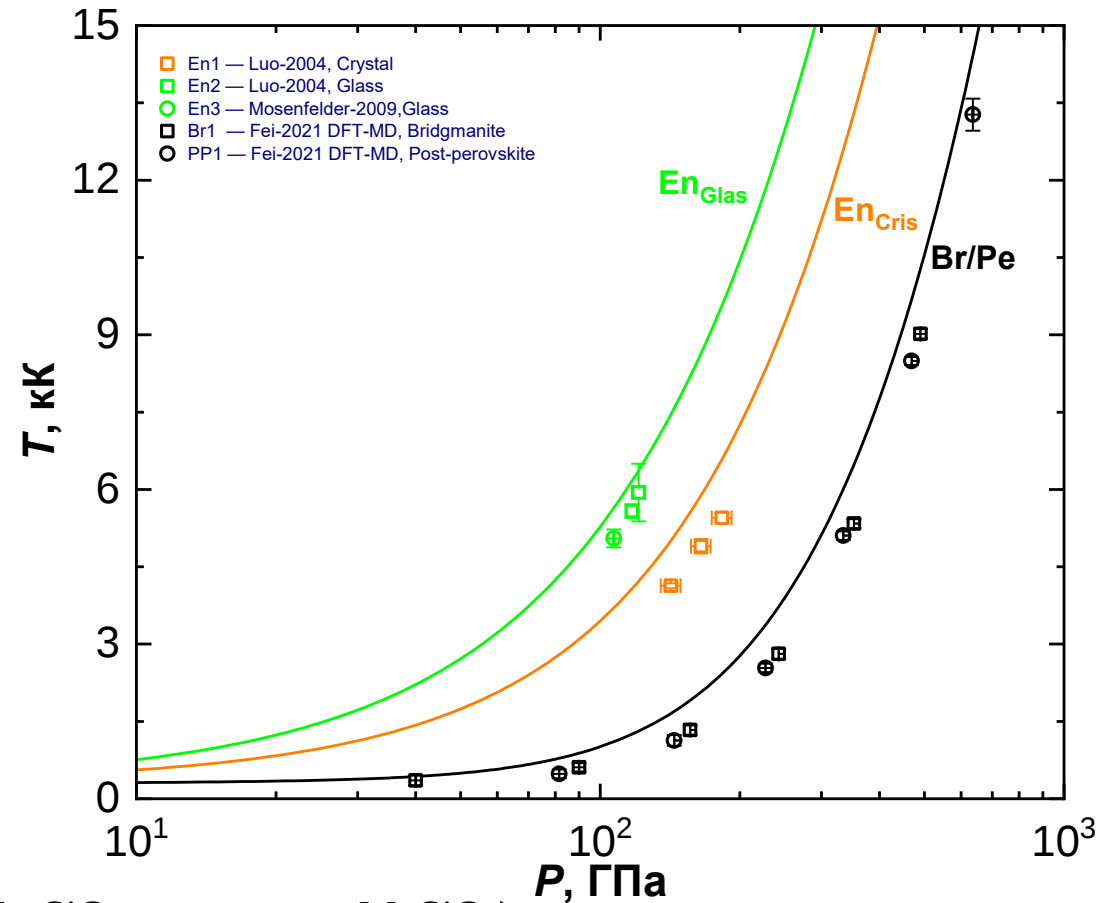
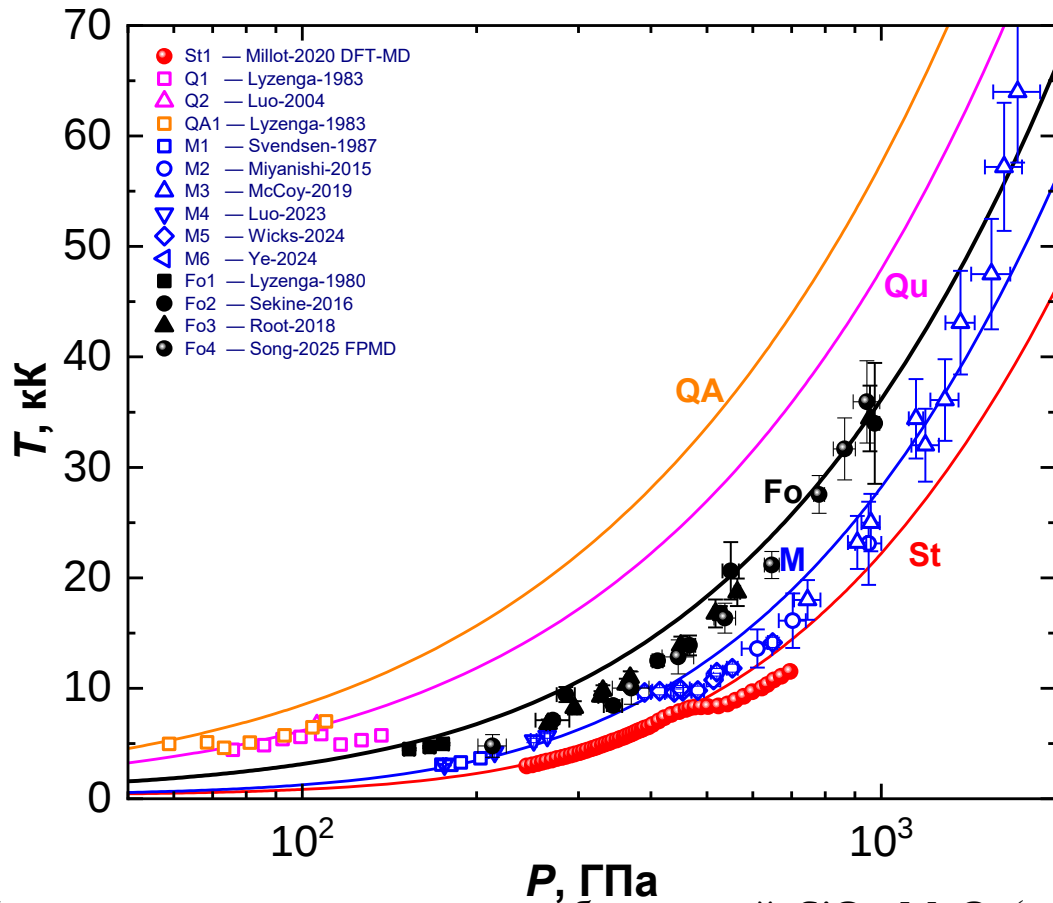
Маркеры — экспериментальные данные для сплошных (Mix1 — [1]) образцов Zr–Nb–Cu–Ni–Al.

Заключение

- Построены уравнения состояния для рения, вольфрама и других веществ (входящих в рассмотренные смеси) на основе которых проведены расчеты ударных адиабат для этих материалов. Результаты расчетов согласуются с данными ударно-волновых экспериментов для сплошных и пористых образцов.
- Построены уравнения состояния для различных смесей при высоких давлениях и температурах.
- Продемонстрированы результаты расчета ударных адиабат для этих смесей, полученные двумя способами:
 - на основе модели уравнения состояния смеси;
 - на основе принципа аддитивности удельных объемов на ударных адиабатах компонентов.
- Результаты расчетов ударных адиабат смесей, полученные с помощью уравнения состояния смеси, согласуются с экспериментальными данными.
- Построенные уравнения состояния для компонентов и смесей могут быть использованы в численном моделировании ударно-волновых процессов при высоких давлениях и температурах.

Спасибо за внимание!

Температура на ударных адиабатах смеси $\text{SiO}_2\text{--MgO}$



Линии — расчет ударных адиабат смесей $\text{SiO}_2\text{--MgO}$ (слева — Mg_2SiO_4 ; справа — MgSiO_3) по уравнению состояния смеси и их компонентов по модели STEOS (St — стишовит с $\rho_{00} = 4.290$ г/см³; Qu — кварц с $\rho_{00} = 2.650$; QA — плавленый кварц с $\rho_{00} = 2.200$). Маркеры — экспериментальные данные.

Millot M. et al. // Science. 2015. Vol. 347. № 6220. P. 418-420.

Luo S.N. et al. // J. Geophys. Res.: Solid Earth. 2004. Vol. 109. № B5. P. B05205.

Miyanishi K. et al. // Phys. Rev. E. 2015. Vol. 92. № 2. P. 023103.

Luo Y. et al. // Phys. Rev. B. 2023. Vol. 107. № 13. P. 134116.

Ye Z. et al. // J. Appl. Phys. 2024. Vol. 136. № 10. P. 105904.

Sekine T. et al. // Sci. Advances. 2016. Vol. 2. № 8. P. e1600157.

Song J. et al. // Geosci. Front. 2025. Vol. 16. № 1. P. 101917.

Fei Y. et al. // Nat. Commun. 2021. Vol. 12. № 1. P. 876.

Lyzenga G.A., Ahrens T.J., Mitchell A.C. // J. Geophys. Res.: Solid Earth. 1983. Vol. 88. № B3. P. 2431-2444.

Svendsen B., Ahrens T.J. // Geophys. J. Int. 1987. Vol. 91. № 3. P. 667-691.

McCoy C.A. et al. // Phys. Rev. B. 2019. Vol. 100. № 1. P. 014106.

Wicks J.K. et al. // Sci. Adv. 2024. Vol. 10. № 23. P. eadk0306.

Lyzenga G.A., Ahrens T. J. // Geophys. Res. Letters. 1980. Vol. 7. № 2. P. 141-144.

Root S. et al. // Geophys. Res. Lett. 2018. Vol. 45. № 9. P. 3865-3872.

Mosenfelder J.L. et al. // J. Geophys. Res.: Solid Earth. 2009. Vol. 114. № B1. P. B01203.