

УДК 536.7

УРАВНЕНИЕ СОСТОЯНИЯ СПЛАВА ГАФНИЯ И ЦИРКОНИЯ ПРИ ВЫСОКИХ ДАВЛЕНИЯХ И ТЕМПЕРАТУРАХ В УДАРНЫХ ВОЛНАХ

© 2024 г. Н. Н. Середкин¹, К. В. Хищенко^{1, 2, 3, *}¹Объединенный институт высоких температур РАН, г. Москва, Россия²Московский физико-технический институт, г. Долгопрудный, Россия³Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск, Россия

*E-mail: konst@ihed.ras.ru

Поступила в редакцию 14.12.2023 г.

После доработки 23.07.2024 г.

Принята к публикации 23.04.2024 г.

Работа посвящена теоретическому описанию термодинамических характеристик сплава гафния и циркония в области высоких давлений и температур при ударном сжатии. Предложена простая модель для термического и калорического уравнений состояния компонентов сплава. В рамках предположения о равенстве температур и давлений в компонентах проведен расчет ударной адиабаты для сплава гафний–цирконий. Результаты расчета показаны в сравнении с имеющимися данными экспериментов с ударными волнами. Полученные уравнения состояния гафния, циркония и их сплава могут быть использованы для моделирования динамики различных процессов при высоких плотностях энергии.

DOI: 10.31857/S0040364424040052

ВВЕДЕНИЕ

Описание термодинамических свойств материалов в условиях высокой концентрации энергии необходимо при построении численных моделей динамики интенсивных импульсных процессов [1–3]. В таких процессах, как взаимодействие лазерного излучения [4–10] или потоков частиц высокой плотности мощности с конденсированным веществом [11–16], электрический взрыв проводников при быстром нагреве мощным импульсом тока [17–21], высокоскоростное соударение тел [22–26], реализуются состояния среды в широком диапазоне давлений и температур. Уравнения состояния материалов требуются в моделировании возникающих при этом физических явлений для замыкания системы уравнений движения [27–30].

Интерес к описанию поведения тугоплавких металлов (в частности, гафния [2, 27, 31–41] и циркония [2, 27, 36, 42–55]) и их смесей с разными компонентами [56–62] при высоких давлениях и температурах обусловлен их широким применением в качестве элементов конструкций, несущих интенсивные силовые и тепловые нагрузки.

В настоящей работе предлагается простая модель термодинамики металлов в широкой области изменения плотностей и температур, на ее основе строятся уравнения состояния гафния и циркония, а также проводятся расчеты термодинамических характеристик сплава гафний–цирконий при ударно-волновом воздействии.

УРАВНЕНИЯ СОСТОЯНИЯ МЕТАЛЛОВ

Термическое и калорическое уравнения состояния металлов задаются в виде сумм

$$P(V, T) = P_c(V) + P_a(V, T) + P_e(V, T), \quad (1)$$

$$E(V, T) = E_c(V) + E_a(V, T) + E_e(V, T), \quad (2)$$

где P – давление, E – удельная внутренняя энергия, V – удельный объем, T – температура. Первые слагаемые в правых частях (1) и (2) – зависимости давления и внутренней энергии при нулевой температуре ($T = 0$) от V , вторые и третьи – тепловой вклад ионов и электронов соответственно.

Давление и внутренняя энергия при $T = 0$ задаются в виде функций от удельного объема (аналогично [9, 22, 40, 55, 63, 64]):

$$P_c(V) = B_{0c} \frac{\zeta^{m+1} - \zeta^{n+1}}{m-n}, \quad (3)$$

$$E_c(V) = \frac{B_{0c} V_{0c}}{mn} \left(\frac{n\zeta^m - m\zeta^n}{m-n} + 1 \right), \quad (4)$$

где $\zeta = V_{0c}/V$; V_{0c} и B_{0c} – удельный объем и модуль объемного сжатия при $T=0$ и $\zeta=1$; m и n – параметры (константы).

Тепловой вклад ионов определяется в квази-гармоническом приближении [27, 65]

$$P_a(V, T) = \frac{\sigma}{V_0} RT \frac{3\theta^2 \gamma + T_a \sigma^{2/3} T}{\theta^2 + T_a \sigma^{2/3} T}, \quad (5)$$

$$E_a(V, T) = \frac{3}{2} RT \frac{2\theta^2 + T_a \sigma^{2/3} T}{\theta^2 + T_a \sigma^{2/3} T}, \quad (6)$$

где $\sigma = V_0/V$; V_0 – удельный объем при нормальных условиях ($T_0 = 293$ К, $P_0 = 0.1$ МПа); $T_a = 0.1$ К; R – удельная газовая постоянная, $R = R_A/M$, R_A – универсальная газовая постоянная; M – молярная масса. Зависимости для характеристической температуры θ и ее производной $\gamma = d\ln\theta/d\ln\sigma$ в (5) и (6) формулируются аналогично [66–69]:

$$\theta(V) = \theta_0 \sigma^{2/3} \exp \left[(\gamma_0 - 2/3) \frac{\delta_n + \ln^2 \sigma_m}{\sqrt{\delta_n}} \times \right. \\ \left. \times \left(\arctg \frac{\ln \sigma - \ln \sigma_m}{\sqrt{\delta_n}} + \arctg \frac{\ln \sigma_m}{\sqrt{\delta_n}} \right) \right], \quad (7)$$

$$\gamma(V) = 2/3 + (\gamma_0 - 2/3) \frac{\delta_n + \ln^2 \sigma_m}{\delta_n + \ln^2 (\sigma/\sigma_m)}, \quad (8)$$

где γ_0 , δ_n и σ_m – константы; $\theta_0 = 1$ кК.

Тепловой вклад электронов задается в форме [68, 69]

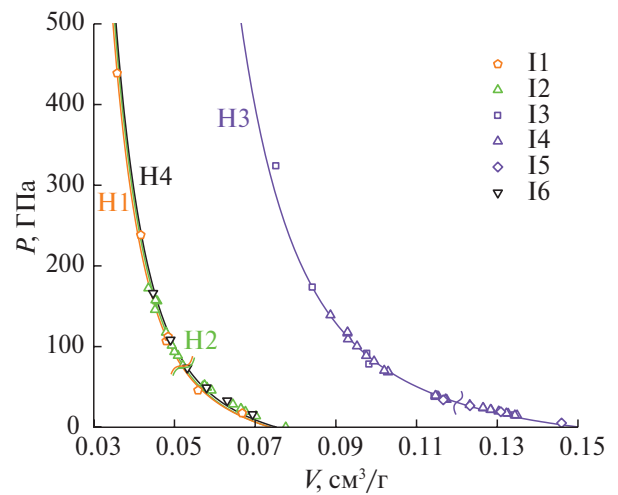
$$P_e(V, T) = \frac{\gamma_{e0}}{V_0} \frac{1}{2} \beta_{e0} \sigma^{1-\gamma_{e0}} T^2, \quad (9)$$

$$E_e(V, T) = \frac{1}{2} \beta_{e0} \sigma^{-\gamma_{e0}} T^2, \quad (10)$$

где β_{e0} и γ_{e0} – константы.

Расчетные ударные адиабаты гафния и циркония представлены на рисунке в сопоставлении с имеющимися результатами измерений ударной сжимаемости образцов этих металлов [31, 33, 43, 44]. Ударные адиабаты металлов рассчитывались путем решения системы уравнений состояния (1)–(10) и уравнения сохранения энергии при ударном сжатии [1]

$$E = E_0 + \frac{1}{2} (P + P_0) (V_{00} - V), \quad (11)$$



Давление в зависимости от удельного объема при ударном сжатии гафния, циркония и их сплава: сплошные линии – результаты расчетов по представленным уравнениям состояния для образцов гафния с $\rho_{00} = 13.16$ (H1) и 12.89 г/см³ (H2), циркония с $\rho_{00} = 6.51$ г/см³ (H3) и их сплава с $\rho_{00} = 12.83$ г/см³ (H4); маркеры – экспериментальные данные (I1 – [31]; I2, I4 – [33]; I3 – [43]; I5 – [44]; I6 – [58]); волнистые линии – примерное положение нижних границ областей β -фаз гафния и циркония на ударных адиабатах.

Константы уравнений состояния для гафния и циркония

Параметр	Гафний	Цирконий
M , г/моль	178.49	91.224
V_0 , см³/г	0.073746	0.1506
V_{0c} , см³/г	0.072953	0.149501
B_{0c} , ГПа	109.656	91.9603
m	0.33	0.53
n	0.3	0.55
γ_0	2.1	1.25
δ_n	16	16
σ_m	0.9	0.9
β_{e0}	0.01205	0.0067
γ_{e0}	0.43	0.45

где E , P и V – характеристики состояния образца за фронтом ударной волны; E_0 , P_0 и V_{00} – перед ним.

Анализ рисунка свидетельствует о хорошем согласии расчетных кривых с экспериментальными точками выше 77 (для гафния) и 34 ГПа (для циркония), соответствующими областям объемно-центрированной кубической кристаллической β -фазы и расплава металлов при ударно-волновом воздействии.

Константы уравнений состояния (1)–(10) гафния и циркония, приведенные в таблице, выбраны из условия оптимального описания имеющихся для этих металлов экспериментальных данных при высоких давлениях.

УРАВНЕНИЕ СОСТОЯНИЯ СПЛАВА ГАФНИЙ–ЦИРКОНИЙ

Термодинамические характеристики сплава (смеси) можно найти на основе предположения о равенстве температур и давлений в его компонентах [29, 59, 61, 62, 70]. При этом удельный термодинамический потенциал (энергия Гиббса) сплава определяется в виде суммы

$$G(P, T) = \sum_{i=1}^N \alpha_i G_i(P, T), \quad (12)$$

где α_i – массовая доля i -го компонента, G_i – удельный термодинамический потенциал i -го компонента, N – число компонентов. Тогда энтропия $S = -(\partial G / \partial T)_P$, удельный объем $V = (\partial G / \partial P)_T$ и удельная внутренняя энергия $E = G + TS - PV$ для сплава получаются из (12) также в виде сумм:

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

$$V(P, T) = \sum_{i=1}^N \alpha_i V_i(P, T), \quad (13)$$

$$E(P, T) = \sum_{i=1}^N \alpha_i E_i(P, T), \quad (14)$$

где величины с индексами i соответствуют i -му компоненту смеси.

При заданном давлении P температура T и удельный объем V (13) ударно-сжатого сплава определяются путем решения системы из термических уравнений состояния компонентов $P_i(V_i, T) = P$ и уравнения сохранения энергии (11), в котором E задается уравнением (14) и калорическими уравнениями состояния компонентов $E_i = E_i(V_i, T)$.

Ударная адиабата образцов сплава гафния ($\alpha_{\text{Hf}} = 0.98$) и циркония ($\alpha_{\text{Zr}} = 0.02$) с исходной плотностью $\rho_{00} = 12.83 \text{ г/см}^3$ ($V_{00} = 1/\rho_{00}$), рассчитанная в рамках представленного подхода, приведена на рисунке в сопоставлении с экспериментальными данными [58]. Этот рисунок иллюстрирует хорошее согласие результатов расчета с имеющимися ударно-волновыми данными для сплава гафний–цирконий при высоких давлениях.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные уравнения состояния гафния и циркония хорошо согласуются с имеющими-

ся данными ударно-волновых экспериментов при высоких давлениях и температурах. Предложенная модель термодинамического потенциала сплава позволяет на основе этих уравнений состояния компонентов адекватно описать поведение сплава гафний–цирконий при ударном сжатии. Разработанные уравнения состояния металлов и их сплава могут быть использованы при численном моделировании динамики различных процессов при высоких плотностях энергии.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда (грант № 19-19-00713, <https://rscf.ru/project/19-19-00713/>).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Зельдович Я.Б., Райзер Ю.П. Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений. М.: Наука, 1966.
2. McQueen R.G., Marsh S.P., Taylor J.W., Fritz J.N., Carter W.J. The Equation of State of Solids from Shock Wave Studies // High-Velocity Impact Phenomena / Ed. Kinslow R. N.Y.: Acad. Press, 1970. P. 293.
3. Бушман А.В., Канель Г.И., Ни А.Л., Фортков В.Е. Теплофизика и динамика интенсивных импульсных воздействий. Черноголовка: ОИХФ АН СССР, 1988.
4. Руденко В.Н. Об испарении вещества под действием излучения лазера // ТВТ. 1967. Т. 5. № 5. С. 877.
5. Гуськов С.Ю., Красюк И.К., Семенов А.Ю., Стучебрюхов И.А., Хищенко К.В. Извлечение ударной адиабаты металлов по характеристикам затухания ударной волны в лазерном эксперименте // Письма в ЖЭТФ. 2019. Т. 109. № 8. С. 525.
6. Борейшо А.С., Джгамадзе Г.Т., Зыбина В.В., Моисеев А.А., Савин А.В., Смирнов П.Г., Смоленцев С.С., Тимофеев В.А., Третьяк П.С. Микроуровневое моделирование теплофизических и гидродинамических процессов селективного лазерного сплавления // ТВТ. 2022. Т. 60. № 1. С. 108.
7. Хохлов В.А., Жаховский В.В., Иногамов Н.А., Ашитков С.И., Ситников Д.С., Хищенко К.В., Петров Ю.В., Манохин С.С., Неласов И.В., Шенелев В.В., Колобов Ю.Р. Плавление титана ударной волной, вызванной мощным фемтосекундным лазерным импульсом // Письма в ЖЭТФ. 2022. Т. 115. № 9. С. 576.
8. Ашитков С.И., Иногамов Н.А., Комаров П.С., Петров Ю.В., Ромашевский С.А., Ситников Д.С., Струлева Е.В., Хохлов В.А. Сверхбыстрый перенос энергии в металлах в сильно неравновесном состоянии, индуцируемом фемтосекундными лазерными импульсами субтераваттной интенсивности // ТВТ. 2022. Т. 60. № 2. С. 218.
9. Семенов А.Ю., Абросимов С.А., Стучебрюхов И.А., Хищенко К.В. Изучение динамики волновых процессов сжатия и расширения в палладии при пикосекундном лазерном воздействии // ТВТ. 2023. Т. 61. № 4. С. 542.

10. Ашитков С.И., Струлева Е.В., Комаров П.С., Евлашин С.А. Ударное сжатие молибдена при воздействии ультракороткими лазерными импульсами // ТВТ. 2023. Т. 61. № 5. С. 790.
11. Котельников В.А. Поток тепла, связанный с переносом заряженных частиц на сферу, помещенную в плазму // ТВТ. 1986. Т. 24. № 1. С. 167.
12. Волков Н.Б., Майер А.Е., Яловец А.П. О механизме кратерообразования на поверхности твердых тел при воздействии интенсивных пучков заряженных частиц // ЖТФ. 2002. Т. 72. № 8. С. 34.
13. Mayer A.E., Mayer P.N. Continuum Model of Tensile Fracture of Metal Melts and Its Application to a Problem of High-Current Electron Irradiation of Metals // J. Appl. Phys. 2015. V. 118. № 3. P. 035903.
14. Gnyusov S.F., Rotshtein V.P., Mayer A.E., Rostov V.V., Gunin A.V., Khishchenko K.V., Levashov P.R. Simulation and Experimental Investigation of the Spall Fracture of 304L Stainless Steel Irradiated by a Nanosecond Relativistic High-Current Electron Beam // Int. J. Fract. 2016. V. 199. № 1. P. 59.
15. Фролова А.А., Хищенко К.В., Чарахчян А.А. Быстрое зажигание пучком протонов и горение цилиндрической оболочечной ДТ-мишени // Физика плазмы. 2019. Т. 45. № 9. С. 804.
16. Гуревич М.И., Казаков Е.Д., Калинин Ю.Г., Курило А.А., Тельковская О.В., Чукбар К.В. О разрушении упругих полимерных материалов под воздействием электронного пучка // ЖТФ. 2021. Т. 91. № 11. С. 1655.
17. Лебедев С.В., Савватимский А.И. Об исчезновении электропроводности металла вследствие сильного нагревания электрическим током большой плотности // ТВТ. 1970. Т. 8. № 3. С. 524.
18. Дихтер И.Я., Зейгарник В.А. Исследование электровзрыва цезиевой проволоочки при давлениях до 500 атм // ТВТ. 1975. Т. 13. № 3. С. 483.
19. Кривошеев С.И., Титков В.В., Шнеерсон Г.А. Двухмерная диффузия поля и магнитогидродинамическое течение при электрическом взрыве одновитковых соленоидов малого объема в мегагауссном магнитном поле // ЖТФ. 1997. Т. 67. № 4. С. 32.
20. Barengolts S.A., Uimanov I.V., Oreshkin V.I., Khishchenko K.V., Oreshkin E.V. Effect of the Temperature of an Electrode Microprotrusion on the Microcrater Formation on the Electrode Surface upon Pulsed and Radiofrequency Vacuum Breakdowns // Vacuum. 2022. V. 204. P. 111364.
21. Онуфриев С.В., Савватимский А.И. Электросопротивление жидкого углерода (до 9000 К) и жидкого гадолиния (до 6000 К) при повышенном давлении и высоких температурах // ТВТ. 2023. Т. 61. № 5. С. 685.
22. Popova T.V., Mayer A.E., Khishchenko K.V. Evolution of Shock Compression Pulses in Polymethylmethacrylate and Aluminum // J. Appl. Phys. 2018. V. 123. № 23. P. 235902.
23. Александров В.В., Браницкий А.В., Грабовский Е.В., Лаухин Я.Н., Олейник Г.М., Ткаченко С.И., Фролов И.Н., Хищенко К.В. Исследование удара дюра-люминиевого флаера по вольфрамовой мишени на установке Ангара-5-1 // Физика плазмы. 2019. Т. 45. № 5. С. 406.
24. Khishchenko K.V., Mayer A.E. High- and Low-Entropy Layers in Solids behind Shock and Ramp Compression Waves // Int. J. Mech. Sci. 2021. V. 189. P. 105971.
25. Ростиков Т.А., Зиборов В.С. Экспериментальное исследование ударных волн в режиме стационарного распространения в полимеризованной эпоксидной смоле // ТВТ. 2022. Т. 60. № 6. С. 922.
26. Чупров П.А., Уткин П.С., Фортнова С.В., Киверин А.Д. Численное моделирование взаимодействия ударной волны со слоем пены с использованием двухжидкостного подхода // ТВТ. 2023. Т. 61. № 3. С. 443.
27. Бушман А.В., Ломоносов И.В., Фортнов В.Е. Уравнения состояния металлов при высоких плотностях энергии. Черноголовка: ИХФЧ РАН, 1992.
28. Ломоносов И.В., Фортнова С.В. Широкодиапазонные полуэмпирические уравнения состояния вещества для численного моделирования высокоэнергетических процессов // ТВТ. 2017. Т. 55. № 4. С. 596.
29. Маевский К.К. Численное моделирование термодинамических параметров германия // ТВТ. 2022. Т. 60. № 6. С. 837.
30. Бельхеева Р.К. О влиянии пористости и давления на параметры уравнения состояния пористых веществ // ТВТ. 2023. Т. 61. № 5. С. 693.
31. Баканова А.А., Дудолодов И.П., Сутолов Ю.Н. Электронные переходы в гафнии, европии и иттербии при высоких давлениях // ФТТ. 1969. Т. 11. № 7. С. 1881.
32. Пелецкий В.Э., Дружинин В.П. Экспериментальное исследование некоторых физических свойств гафния в области высоких температур // ТВТ. 1971. Т. 9. № 3. С. 539.
33. LASL Shock Hugoniot Data / Ed. Marsh S.P. Berkeley, CA: Univ. of California Press, 1980.
34. Савватимский А.И., Коробенко В.Н. Плотность жидкого гафния от точки плавления до точки кипения // ТВТ. 2007. Т. 45. № 2. С. 187.
35. Онуфриев С.В., Петухов В.А., Песочин В.Р., Тарасов В.Д. Теплофизические свойства гафния в интервале температур 293–2000 К // ТВТ. 2008. Т. 46. № 2. С. 230.
36. Онуфриев С.В. Оценка критических параметров циркония, гафния и вольфрама // ТВТ. 2011. Т. 49. № 2. С. 213.
37. Arblaster J.W. Thermodynamic Properties of Hafnium // J. Phase Equilib. Diffus. 2014. V. 35. № 4. P. 490.
38. Молодец А.М., Гольшев А.А. Откольная прочность ударно-разогретого гафния и уравнения состояния его полиморфных модификаций // ФТТ. 2019. Т. 61. № 8. С. 1492.
39. Huston L.Q., Velisavljevic N., Smith J.S., Gray III G.T., Sturtevant B.T. Multi-phase Equation of State of Ultrapure Hafnium to 120 GPa // J. Phys.: Condens. Matter. 2022. V. 34. P. 055401.

40. *Khishchenko K.V.* Equation of State of Hafnium at High Pressures in Shock Waves // *Phys. Wave Phenom.* 2023. V. 31. № 2. P. 123.
41. *Шумихин А.С.* Проблема уравнения состояния тугоплавких металлов в околокритической области // *ТВТ.* 2023. Т. 61. № 5. С. 655.
42. *Walsh J.M., Rice M.H., McQueen R.G., Yarger F.L.* Shock-Wave Compressions of Twenty-Seven Metals Equations of State of Metals // *Phys. Rev.* 1957. V. 108. № 2. P. 196.
43. *Альтишулер Л.В., Баканова А.А., Дудолодов И.П.* Влияние электронной структуры на сжимаемость металлов при высоких давлениях // *ЖЭТФ.* 1967. Т. 53. № 6. С. 1967.
44. *Альтишулер Л.В., Баканова А.А., Дудолодов И.П., Дынин Е.А., Трунин Р.Ф., Чекин Б.С.* Ударные адиабаты металлов. Новые данные, статистический анализ и общие закономерности // *ПМТФ.* 1981. № 2. С. 3.
45. *Коробенко В.Н., Савватимский А.И.* Температурная зависимость плотности и удельного электросопротивления жидкого циркония до 4100 К // *ТВТ.* 2001. Т. 39. № 4. С. 566.
46. *Подурец А.М., Дорохин В.В., Трунин Р.Ф.* Рентгеноструктурное исследование фазовых ударно-волновых превращений в цирконии и висмуте // *ТВТ.* 2003. Т. 41. № 2. С. 254.
47. *Greeff C.W.* Phase Changes and the Equation of State of Zr // *Modelling Simul. Mater. Sci. Eng.* 2005. V. 13. P. 1015.
48. *Rigg P.A., Saavedra R.A., Scharff R.J.* Sound Speed Measurements in Zirconium Using the Front Surface Impact Technique // *J. Phys.: Conf. Ser.* 2014. V. 500. P. 032014.
49. *Saxena A.K., Kaushik T.C., Gupta S.C.* Shock Loading Characteristics of Zr and Ti Metals Using Dual Beam Velocimeter // *J. Appl. Phys.* 2015. V. 118. P. 075904.
50. *Hu C.E., Zeng Z.Y., Cai L.C.* Dynamic Stability of Zr under High Pressure and High Temperature // *Acta Phys. Sin.* 2015. V. 64. № 4. P. 046401.
51. *Kalita P., Brown J., Specht P., Root S., White M., Smith J.S.* Dynamic X-Ray Diffraction and Nanosecond Quantification of Kinetics of Formation of β -Zirconium under Shock Compression // *Phys. Rev. B.* 2020. V. 102. P. 060101.
52. *Radousky H.B., Armstrong M.R., Austin R.A., Stavrou E., Brown S., Chernov A.A., Gleason A.E., Granados E., Grivickas P., Holtgrewe N., Lee H.J., Lobanov S.S., Nagler B., Nam I., Prakapenka V., Prescher C., Walter P., Goncharov A.F., Belof J.L.* Melting and Refreezing of Zirconium Observed Using Ultrafast X-Ray Diffraction // *Phys. Rev. Res.* 2020. V. 2. P. 013192.
53. *O'Bannon III E.F., Söderlind P., Sneed D., Lipp M.J., Cynn H., Smith J.S., Park C., Jenei Zs.* High Pressure Stability of β -Zr: No Evidence for Isostructural Phase Transitions // *High Pressure Res.* 2021. V. 41. № 3. P. 247.
54. *Liu L., Jing Q., Geng H.Y., Li Y., Zhang Y., Li J., Li S., Chen X., Gao J., Wu Q.* Revisiting the High-Pressure Behaviors of Zirconium: Nonhydrostaticity Promoting the Phase Transitions and Absence of the Isostructural Phase Transition in β -Zirconium // *Materials.* 2023. V. 16. P. 5157.
55. *Хищенко К.В.* Уравнение состояния циркония при высоких давлениях // *ТВТ.* 2023. Т. 61. № 5. С. 783.
56. *Алексеев Ю.Ф., Альтишулер Л.В., Крупникова В.П.* Ударное сжатие двухкомпонентных парафиновольфрамовых смесей // *ПМТФ.* 1971. № 4. С. 152.
57. *Баканова А.А., Дудолодов И.П., Сулулов Ю.Н.* Выполнение правила аддитивности для ряда сплавов при ударном сжатии // *ПМТФ.* 1972. № 6. С. 167.
58. *Gust W.H., Royce E.B.* New Electronic Interactions in Rare-Earth Metals at High Pressure // *Phys. Rev. B.* 1973. V. 8. № 8. P. 3595.
59. *Кинеловский С.А., Маевский К.К.* Модель поведения алюминия и смесей на его основе при ударно-волновом воздействии // *ТВТ.* 2014. Т. 52. № 6. С. 843.
60. *Бельхеева Р.К.* Уравнение состояния для сильнопористого вещества // *ТВТ.* 2015. Т. 53. № 3. С. 367.
61. *Маевский К.К.* Численное исследование ударно-волнового нагружения металлических композитов на базе W и WC // *ЖТФ.* 2021. Т. 91. № 5. С. 815.
62. *Медведев А.Б.* Определение плотности ядра Земли на основе уравнений состояния железа и титана при высоких давлениях и температурах // *ТВТ.* 2023. Т. 61. № 5. С. 854.
63. *Хищенко К.В.* Уравнение состояния алюминия при высоких давлениях // *ТВТ.* 2023. Т. 61. № 3. С. 477.
64. *Khishchenko K.V.* Equation of State for Tantalum at High Pressures in Waves of Shock Compression and Isentropic Expansion // *Phys. Wave Phenom.* 2023. V. 31. № 4. P. 273.
65. *Lomonosov I.V., Bushman A.V., Fortov V.E.* Equations of State for Metals at High Energy Densities // *High Pressure Science and Technology – 1993* / Eds. Schmidt S.C., Shaner J.W., Samara G.A., Ross M. N.Y.: AIP Press, 1994. P. 117.
66. *Хищенко К.В., Ломоносов И.В., Фортвов В.Е., Шленский О.Ф.* Термодинамические свойства пластиков в широком диапазоне плотностей и температур // *ДАН.* 1996. Т. 349. № 3. С. 322.
67. *Khishchenko K.V., Lomonosov I.V., Fortov V.E.* Thermodynamic Properties and Physical–Chemical Transformations of Polymer Materials at High Temperatures and Pressures // *Int. J. Thermophys.* 2002. V. 23. № 1. P. 211.
68. *Khishchenko K.V., Fortov V.E., Lomonosov I.V., Pavlovskii M.N., Simakov G.V., Zhernokletov M.V.* Shock Compression, Adiabatic Expansion and Multi-Phase Equation of State of Carbon // *AIP Conf. Proc.* 2002. V. 620. P. 759.
69. *Ломоносов И.В., Фортвов В.Е., Фролова А.А., Хищенко К.В., Чарахчян А.А., Шуршалов Л.В.* Моделирование превращения графита в алмаз при динамическом сжатии в конической мишени // *ТВТ.* 2003. Т. 41. № 4. С. 515.
70. *Гударенко Л.Ф., Куделькин В.Г.* Расчет уравнений состояния многокомпонентных смесей в гетерогенном приближении // *Тр. XIV сессии Междун. школы по моделям механики сплошной среды.* М.: МФТИ, 1998. С. 56.