

УДК 536.7

УРАВНЕНИЕ СОСТОЯНИЯ АЛЮМИНИЯ ПРИ ВЫСОКИХ ДАВЛЕНИЯХ

© 2023 г. К. В. Хищенко^{1, 2, 3, 4, *}¹Объединенный институт высоких температур РАН, г. Москва, Россия²Московский физико-технический институт, г. Долгопрудный, Россия³Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск, Россия⁴Федеральный исследовательский центр проблем химической физики и медицинской химии РАН, г. Черноголовка, Россия

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

Поступило в редакцию 31.12.2022 г.

После доработки 05.05.2023 г.

Принято к публикации 11.05.2023 г.

Работа посвящена описанию термодинамических свойств алюминия в широкой области высокоэнергетических состояний. Предложена форма функциональной связи давления, удельного объема и удельной внутренней энергии конденсированной фазы металла. Представлено сравнение расчетных адиабат ударного сжатия алюминия с имеющимися данными ударно-волновых экспериментов. Построенное уравнение состояния может быть использовано для моделирования процессов интенсивного импульсного воздействия на металл.

DOI: 10.31857/S0040364423030134

ВВЕДЕНИЕ

Модели термодинамики материалов в широком диапазоне изменения плотностей и давлений представляют интерес для анализа физических процессов при высокой концентрации энергии [1–3]. Примерами таких процессов являются высокоскоростное соударение тел [4–10], взаимодействие короткого импульса лазерного излучения с твердой мишенью [11–17], электрический взрыв проводника под действием мощного импульса тока [18–24]. В частности, для решения задач численного моделирования динамики возникающих при этом течений необходимо знать взаимосвязь термодинамических характеристик среды во всей области реализуемых состояний [25–31].

В настоящей работе развита модель уравнения состояния конденсированного вещества в форме функции давления от удельного объема и удельной внутренней энергии. Представлены результаты расчетов термодинамических характеристик ударно-сжатого алюминия в сопоставлении с имеющимися данными экспериментов при высоких плотностях энергии.

МОДЕЛЬ УРАВНЕНИЯ СОСТОЯНИЯ

Уравнение состояния задается в виде функциональной взаимосвязи давления P , удельного объема $V = \rho^{-1}$ (ρ – плотность) и удельной внутренней энергии E [32, 33]:

$$P(V, E) = P_c(V) + \frac{\Gamma(V, E)}{V} [E - E_c(V)], \quad (1)$$

где E_c , $P_c = -dE_c/dV$ – составляющие внутренней энергии и давления при $T = 0$; коэффициент Γ определяет отношение теплового вклада в давление к тепловому вкладу в плотность энергии.

Зависимость внутренней энергии от объема на «холодной» кривой (изотерма $T = 0$) задается в виде [34, 35]

$$E_c(V) = \frac{V_{0c} B_{0c}}{m - n} \left(\frac{\zeta^m}{m} - \frac{\zeta^n}{n} \right) + E_s, \quad (2)$$

где $\zeta = V_{0c}/V$; V_{0c} – удельный объем при $P = 0$ и $T = 0$; B_{0c} – модуль объемного сжатия при $T = 0$ ($B_c = -VdP_c/dV$) и $\zeta = 1$; m, n – параметры;

$$E_s = \frac{V_{0c} B_{0c}}{mn}. \quad (3)$$

Зависимость коэффициента Γ от объема и внутренней энергии определяется в форме [36]

$$\Gamma(V, E) = \gamma_i + \frac{\gamma_c(V) - \gamma_i}{1 + \sigma^{-2/3} [E - E_c(V)]/E_a}. \quad (4)$$

Здесь $\sigma = V_0/V$ – степень сжатия; V_0 – удельный объем при нормальных условиях ($P = P_0$, $E = E_0$); γ_c – коэффициент Грюнайзена $\gamma = V(\partial P/\partial E)_V$ при $T = 0$; γ_i, E_a – параметры. Функция коэффициента γ_c от объема задается согласно выражению [37, 38]

$$\gamma_c(V) = 2/3 + (\gamma_{0c} - 2/3) \frac{\delta_n + \ln^2 \sigma_m}{\delta_n + \ln^2 (\sigma/\sigma_m)}, \quad (5)$$

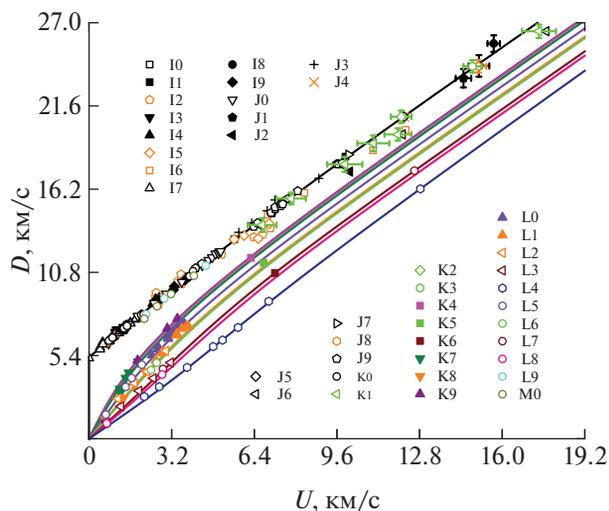


Рис. 1. Волновая скорость D как функция массовой скорости U на ударных адиабатах образцов алюминия с различной начальной плотностью ρ_{00} : линии – результаты расчета по уравнению состояния (1)–(6) при $\rho_{00} = 2.71, 1.92, 1.89, 1.816, 1.585, 1.35, 1.3, 0.909, 0.77$ и 0.34 г/см^3 (начиная с верхней кривой); маркеры – экспериментальные данные для сплошных (10 – [39], 11 – [40], 12 – [41], 13 – [42], 14 – [43], 15 – [44], 16 – [45], 17 – [46], 18 – [47], 19 – [48], 20 – [49], 21 – [50], 22 – [51], J3 – [52], J4 – [53], J5 – [54], J6 – [55] в интерпретации [56], J7 – [56], J8 – [57], J9 – [58], K0 – [59], K1 – [55] в интерпретации [60], K2 – [53, 54] в интерпретации [60], K3 – [57] в интерпретации [60]) и пористых образцов (K4–K6 – [40]; K7, K8 – [42]; K9, L0, L1 – [43]; L2, L3 – [61]; L4 – [62]; L5–L8 – [59]; L9, M0 – [63]).

в котором

$$\gamma_{0c} = \gamma_i + (\gamma_0 - \gamma_i) \left[1 + \frac{E_0 - E_c(V_0)}{E_a} \right]^{-2}, \quad (6)$$

γ_0 – коэффициент Грюнайзена при нормальных условиях; σ_m, δ_n – параметры.

ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА АЛЮМИНИЯ

Результаты расчета ударных адиабат сплошных и пористых образцов алюминия по полученному уравнению состояния (1)–(6) показаны на рис. 1–3 в сопоставлении с экспериментальными данными [39–63].

Следует отметить хорошее согласие расчетной адиабаты для сплошных образцов данного металла с результатами экспериментов [39, 41–44, 46, 48, 49, 58, 59] в области давлений до 0.2 ТПа. При более высоких давлениях имеющиеся экспериментальные данные [40, 41, 44, 45, 47, 50–58] характеризуются значительным разбросом. Одной из причин такой ситуации является использование в разных работах различных представлений об ударных адиабатах эталонных веществ. Пример интерпретации данных для алюминия из разных экспериментов с учетом единой модели урав-

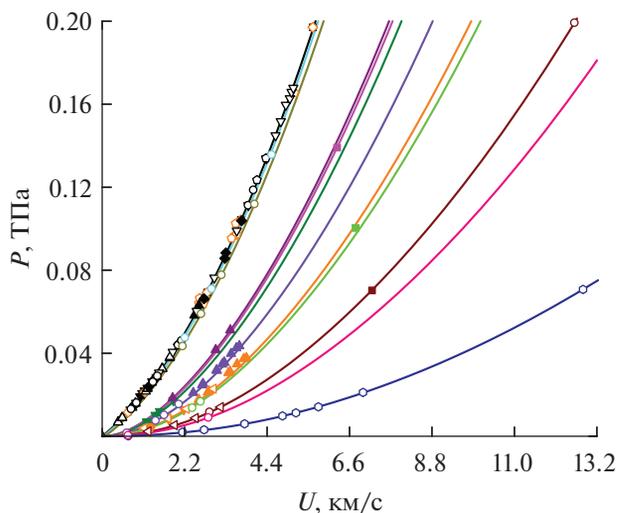


Рис. 2. Давление как функция массовой скорости на ударных адиабатах сплошных и пористых образцов алюминия: линии – результаты расчета для образцов с $\rho_{00} = 2.71, 2.676, 2.607, 1.92, 1.89, 1.816, 1.585, 1.35, 1.3, 0.909, 0.77$ и 0.34 г/см^3 (сверху вниз); остальные обозначения такие же, как на рис. 1.

нения состояния эталона (железа в случае [53–55, 57]) представлен в работе [60]. Расчетная ударная адиабата для сплошных образцов алюминия неплохо согласуется с результатами интерпретации [60], как и с данными абсолютных измерений [47, 50, 58], в рассмотренном диапазоне давлений до 1 ТПа.

Расчетные ударные адиабаты для пористых образцов исследуемого металла также в основном хорошо согласуются с имеющимися данными экспериментов [40, 42, 43, 59, 61–63] при высоких давлениях.

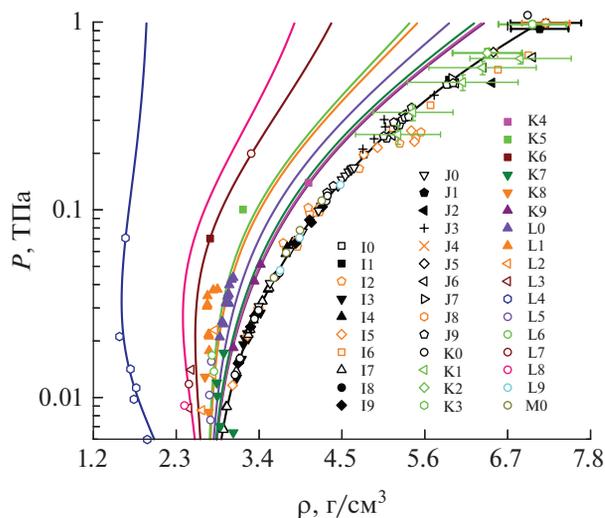


Рис. 3. Давление как функция плотности на ударных адиабатах сплошных и пористых образцов алюминия: линии – результаты расчета по представленному уравнению состояния для $\rho_{00} = 2.71, 1.92, 1.89, 1.816, 1.585, 1.35, 1.3, 0.909, 0.77$ и 0.34 г/см^3 (справа налево); остальные обозначения такие же, как на рис. 1.

Параметры уравнения состояния алюминия по модели (1)–(6) выбраны следующие: $V_0 = 0.369$, $V_{0c} = 0.3644 \text{ см}^3/\text{г}$, $B_{0c} = 78.3804 \text{ ГПа}$, $m = 1.33$, $n = 1.1$, $\sigma_m = 0.72$, $\delta_n = 0.7$, $\gamma_{0c} = 1.59$, $\gamma_i = 0.42$, $E_a = 24 \text{ кДж/г}$.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представленное уравнение состояния позволяет обобщить имеющиеся данные ударно-волновых экспериментов для алюминия в широкой области давлений, удельных объемов и удельных внутренних энергий. Данное уравнение состояния может быть использовано при численном моделировании физических процессов в веществе при интенсивных импульсных воздействиях.

Работа выполнена по программе Министерства науки и высшего образования РФ (соглашение с ОИВТ РАН № 075-15-2020-785 от 23 сентября 2020 г.).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Зельдович Я.Б., Райзер Ю.П. Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений. М.: Наука, 1966.
2. Бушман А.В., Фортков В.Е. Модели уравнения состояния вещества // УФН. 1983. Т. 140. № 2. С. 177.
3. Бушман А.В., Канель Г.И., Ни А.Л., Фортков В.Е. Теплофизика и динамика интенсивных импульсных воздействий. Черногловка: ОИХФ АН СССР, 1988.
4. Агурейкин В.А., Анисимов С.И., Бушман А.В., Канель Г.И., Карягин В.П., Константинов А.Б., Крюков Б.П. и др. Теплофизические и газодинамические проблемы противометеоритной защиты космического аппарата "Вега" // ТВТ. 1984. Т. 22. № 5. С. 964.
5. Kanel G.I., Fortov V.E., Khishchenko K.V., Utkin A.V., Razorenov S.V., Lomonosov I.V., Mehlhorn T. et al. Thin Foil Acceleration Method for Measuring the Unloading Isentropes of Shock-compressed Matter // AIP Conf. Proc. 2000. V. 505. P. 1179.
6. 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.
7. 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.
8. Александров В.В., Браницкий А.В., Грабовский Е.В., Лухин Я.Н., Олейник Г.М., Ткаченко С.И., Фролов И.Н., Хищенко К.В. Исследование удара дюралюминиевого фляера по фольгированной мишени на установке Ангара-5-1 // Физика плазмы. 2019. Т. 45. № 5. С. 406.
9. 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.
10. Николаев Д.Н., Кулиш М.И., Дудин С.В., Минцев В.Б., Ломоносов И.В., Фортков В.Е. Ударная сжимаемость монокристаллического кремния в диапазоне давлений 280–510 ГПа // ТВТ. 2021. Т. 59. № 6. С. 860.
11. Андреев Н.Е., Вейсман М.Е., Костин В.В., Фортков В.Е. Формирование ударной волны под действием ультракоротких лазерных импульсов // ТВТ. 1996. Т. 34. № 3. С. 379.
12. Povarnitsyn M.E., Itina T.E., Khishchenko K.V., Levashov P.R. Simulation of Double-pulse Laser Ablation // AIP Conf. Proc. 2010. V. 1278. P. 635.
13. Абросимов С.А., Бажулин А.П., Воронов В.В., Красюк И.К., Пашинин П.П., Семенов А.Ю., Стучебрюхов И.А., Хищенко К.В., Черномырдин В.И. Исследование механических свойств алюминия, сплава АМг6М и полиметилметакрилата при высоких скоростях деформирования под действием лазерного излучения пикосекундной длительности // ДАН. 2012. Т. 442. № 6. С. 752.
14. Иногамов Н.А., Петров Ю.В., Хохлов В.А., Жаховский В.В. Лазерная абляция: физические представления и приложения (обзор) // ТВТ. 2020. Т. 58. № 4. С. 689.
15. Струлёва Е.В., Комаров П.С., Ашитков С.И. Поведение тантала вблизи критической точки при фемтосекундном лазерном нагреве // ТВТ. 2021. Т. 59. № 1. С. 148.
16. Semenov A. Yu., Stuchebryukhov I.A., Khishchenko K.V. Modeling of Shock-wave Processes in Aluminum under the Action of a Short Laser Pulse // Math. Montis. 2021. V. 50. P. 108.
17. Ашитков С.И., Иногамов Н.А., Комаров П.С., Петров Ю.В., Ромашевский С.А., Ситников Д.С., Струлёва Е.В., Хохлов В.А. Сверхбыстрый перенос энергии в металлах в сильно неравновесном состоянии, индуцируемом фемтосекундными лазерными импульсами субгерцоватной интенсивности // ТВТ. 2022. Т. 60. № 2. С. 218.
18. Ткаченко С.И., Хищенко К.В., Воробьев В.С., Левашов П.Р., Ломоносов И.В., Фортков В.Е. Метастабильные состояния жидкого металла при электрическом взрыве // ТВТ. 2001. Т. 39. № 5. С. 728.
19. Tkachenko S.I., Levashov P.R., Khishchenko K.V. Analysis of Electrical Conductivity Measurements in Strongly Coupled Tungsten and Aluminum Plasmas // Czech. J. Phys. 2006. V. 56. Suppl. 2. P. B419.
20. Oreshkin V.I., Baksh R.B., Ratakhin N.A., Labetsky A. Yu., Rouskikh A.G., Shishlov A.V., Levashov P.R. et al. Effect of the Thermal Instabilities on Electrical Explosion of Thin Metal Wires // AIP Conf. Proc. 2006. V. 849. P. 262.
21. Barendgolts S.A., Uimanov I.V., Oreshkin V.I., Khishchenko K.V., Oreshkin E.V. Plasma–Liquid Interaction During a Pulsed Vacuum Breakdown // J. Appl. Phys. 2021. V. 129. P. 133301.
22. Савватимский А.И. Теплоемкость и электросопротивление металлов Та и W от точки плавления до 7000 К при импульсном нагреве током // ТВТ. 2021. Т. 59. № 5. С. 686.
23. Barendgolts 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.
24. Савватимский А.И., Онуфриев С.В., Седегов А.С., Юдин С.Н., Московских Д.О. Теплофизические свойства высокоэнтропийного карбида (HfTaTiNbZr)C при температурах от 2500 до 5500 К // ТВТ. 2022. Т. 60. № 5. С. 672.
25. Бельхеева Р.К. Уравнение состояния для сильнопористого вещества // ТВТ. 2015. Т. 53. № 3. С. 367.
26. Ломоносов И.В., Форткова С.В. Широкодиапазонные полуэмпирические уравнения состояния вещества для численного моделирования высокоэнергетических процессов // ТВТ. 2017. Т. 55. № 4. С. 596.
27. Гилев С.Д. Малопараметрическое уравнение состояния алюминия // ТВТ. 2020. Т. 58. № 2. С. 179.
28. Бельхеева Р.К. Модель коэффициента Грюнайзена для широкого диапазона плотностей на примере меди // ТВТ. 2021. Т. 59. № 4. С. 514.

29. *Маевский К.К.* Численное моделирование термодинамических параметров углерода // ТВТ. 2021. Т. 59. № 5. С. 701.
30. *Афельбаум Е.М., Воробьев В.С.* Универсальное уравнение состояния для критической и сверхкритических областей // ТВТ. 2021. Т. 59. № 6. С. 852.
31. *Маевский К.К.* Численное моделирование термодинамических параметров германия // ТВТ. 2022. Т. 60. № 6. С. 837.
32. *Бушман А.В., Ефремов В.П., Ломоносов И.В., Уткин А.В., Фортвов В.Е.* Ударная сжимаемость и уравнение состояния углепластика при высоких плотностях энергии // ТВТ. 1990. Т. 28. № 6. С. 1232.
33. *Бушман А.В., Жерноклетов М.В., Ломоносов И.В., Сутулов Ю.Н., Фортвов В.Е., Хищенко К.В.* Ударная сжимаемость и уравнение состояния полиимида // Письма в ЖЭТФ. 1993. Т. 58. № 8. С. 640.
34. *Бушман А.В., Ломоносов И.В., Фортвов В.Е., Хищенко К.В.* Уравнения состояния полимерных материалов при высоких давлениях // Хим. физика. 1994. Т. 13. № 1. С. 64.
35. *Бушман А.В., Ломоносов И.В., Фортвов В.Е., Хищенко К.В.* Уравнения состояния насыщенных органических соединений при высоких давлениях // Хим. физика. 1994. Т. 13. № 5. С. 97.
36. *Хищенко К.В., Жерноклетов М.В., Ломоносов И.В., Сутулов Ю.Н.* Динамическая сжимаемость, адиабаты разгрузки и уравнение состояния стибьена при высоких плотностях энергии // ЖТФ. 2005. Т. 75. № 2. С. 57.
37. *Khishchenko K.V.* Equation of State for Bismuth at High Energy Densities // Energies. 2022. V. 15. № 19. P. 7067.
38. *Khishchenko K.V.* Equation of State of Hafnium at High Pressures in Shock Waves // Phys. Wave Phenom. 2023. V. 31. № 2. P. 123.
39. *Альтишулер Л.В., Кормер С.Б., Баканова А.А., Трунин Р.Ф.* Уравнения состояния алюминия, меди и свинца для области высоких давлений // ЖЭТФ. 1960. Т. 38. № 3. С. 790.
40. *Кормер С.Б., Фунтиков А.И., Урлин В.Д., Колесникова А.Н.* Динамическое сжатие пористых металлов и уравнение состояния с переменной теплоемкостью при высоких температурах // ЖЭТФ. 1962. Т. 42. № 3. С. 686.
41. *Skidmore I.C., Morris E.* Experimental Equation-of-state Data for Uranium and Its Interpretation in the Critical Region // Thermodynamics of Nuclear Materials. Vienna: IAEA, 1962. P. 173.
42. *Morgan D.T., Rockowitz M., Atkinson A.L.* Measurement of the Grueneisen Parameter and the Internal Energy Dependence of the Solid Equation of State for Aluminum and Teflon. Tech. Rep. AFWL-TR-65-117. Kirtland Air Force Base, NM: Air Force Weapons Laboratory, 1965.
43. *Anderson G.D., Doran D.G., Fahrenbruch A.L.* Equation of State of Solids: Aluminum and Teflon. Tech. Rep. AFWL-TR-65-147. Kirtland Air Force Base, NM: Air Force Weapons Laboratory, 1965.
44. *Альтишулер Л.В., Чекин Б.С.* Метрология высоких импульсных давлений // Докл. I Всес. симп. по импульсным давлениям. М.: ВНИИФТРИ, 1974. Т. 1. С. 5.
45. *Альтишулер Л.В., Калиткин Н.Н., Кузьмина Л.В., Чекин Б.С.* Ударные адиабаты при сверхвысоких давлениях // ЖЭТФ. 1977. Т. 72. № 1. С. 317.
46. *LASL Shock Hugoniot Data* / Ed. Marsh S.P. Berkeley: Univ. of California Press, 1980.
47. *Волков Л.П., Волошин Н.П., Владимиров А.С., Ногин В.Н., Симоненко В.А.* Ударная сжимаемость алюминия при давлении 10 Мбар // Письма в ЖЭТФ. 1980. Т. 31. № 11. С. 623.
48. *Альтишулер Л.В., Баканова А.А., Дудолов 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.
49. *Mitchell A.C., Nellis W.J.* Shock Compression of Aluminum, Copper, and Tantalum // J. Appl. Phys. 1981. V. 52. № 5. P. 3363.
50. *Симоненко В.А., Волошин Н.П., Владимиров А.С., Нагибин А.П., Ногин В.Н., Попов В.А., Сальников В.А., Шойдин Ю.А.* Абсолютные измерения ударной сжимаемости алюминия при давлениях $p \geq 1$ ТПа // ЖЭТФ. 1985. Т. 88. № 4. С. 1452.
51. *Трунин Р.Ф.* Сжимаемость различных веществ при высоких давлениях ударных волн. Обзор // Изв. АН СССР. Сер. Физика Земли. 1986. № 2. С. 26.
52. *Глушак Б.Л., Жарков А.П., Жерноклетов М.В., Терновой В.Я., Филимонов А.С., Фортвов В.Е.* Экспериментальное изучение плотной плазмы металлов при высоких концентрациях энергии // ЖЭТФ. 1989. Т. 96. № 4. С. 1301.
53. *Трунин Р.Ф., Панов Н.В., Медведев А.Б.* Ударная сжимаемость железа, алюминия и тантала при терапаскальных давлениях // Хим. физика. 1995. Т. 14. № 2–3. С. 97.
54. *Трунин Р.Ф., Панов Н.В., Медведев А.Б.* Ударная сжимаемость железа, алюминия и тантала при терапаскальных давлениях, полученных в лабораторных условиях // ТВТ. 1995. Т. 33. № 2. С. 329.
55. *Аврорин Е.Н., Водолага Б.К., Волошин Н.П., Коваленко Г.В., Куропатенко В.Ф., Симоненко В.А., Черноволок Б.Т.* Экспериментальное изучение оболочечных эффектов на ударных адиабатах конденсированных веществ // ЖЭТФ. 1987. Т. 93. № 2. С. 613.
56. *Трунин Р.Ф., Подурец М.А., Симаков Г.В., Попов Л.В., Севастьянов А.Г.* Новые данные по сжимаемости алюминия, плексигласа и кварца, полученные в условиях сильной ударной волны подземного ядерного взрыва // ЖЭТФ. 1995. Т. 108. № 3. С. 581.
57. *Трунин Р.Ф., Панов Н.В., Медведев А.Б.* Сжимаемость железа, алюминия, молибдена, титана и тантала при давлениях ударных волн 1–2.5 ТПа // Письма в ЖЭТФ. 1995. Т. 62. № 7. С. 572.
58. *Knudson M.D., Lemke R.W., Hayes D.B., Hall C.A., Deeney C., Asay J.R.* Near-absolute Hugoniot Measurements in Aluminum to 500 GPa Using a Magnetically Accelerated Flyer Plate Technique // J. Appl. Phys. 2003. V. 94. № 7. P. 4420.
59. *Трунин Р.Ф., Гударенко Л.Ф., Жерноклетов М.В., Симаков Г.В.* Экспериментальные данные по ударно-волновому сжатию и адиабатическому расширению конденсированных веществ. Саров: РФЯЦ–ВНИИЭФ, 2006.
60. *Orlov N.Yu., Kadatskiy M.A., Denisov O.V., Khishchenko K.V.* Application of Quantum-statistical Methods to Studies of Thermodynamic and Radiative Processes in Hot Dense Plasmas // Matter Radiat. Extremes. 2019. V. 4. № 5. P. 054403.
61. *Баканова А.А., Дудолов И.П., Сутулов Ю.Н.* Ударная сжимаемость пористых вольфрама, молибдена, меди и алюминия в области низких давлений // ПМТФ. 1974. № 2. С. 117.
62. *Трунин Р.Ф., Симаков Г.В., Панов Н.В.* Ударное сжатие пористого алюминия и никеля при мегабарных давлениях // ТВТ. 2001. Т. 39. № 3. С. 430.
63. *Song P., Cai L., Wang Q., Zhou X., Li X., Zhang Y., Yuan S., Weng J., Li J.* Sound Velocity, Temperature, Melting along the Hugoniot and Equation of State for Two Porosity Aluminums // J. Appl. Phys. 2011. V. 110. P. 103522.