

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ ПО ИЗОЭНТРОПИЧЕСКОМУ СЖАТИЮ АЛЮМИНИЯ ДО МЕГАБАРНЫХ ДАВЛЕНИЙ

EXPERIMENTAL RESULTS OF ISENTROPIC COMPRESSION OF ALUMINUM UP TO MEGABAR PRESSURES

*Г. В. Борисков, А. И. Быков, Н. И. Егоров, М. И. Долотенко, В. Н. Павлов, И. С. Стрелков
В. И. Тимарева, С. И. Белов*

V. Boriskov, A. I. Bykov, N. I. Egorov, M. I. Dolotenko, V. N. Pavlov, I. S. Strelkov, V. I. Timareva, S. I. Belov

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ»,

пр. Мира, 37, Саров, Нижегородская область, 607188, Россия

Federal Nuclear Center of Russia – All-Russian Research Institute of Experimental Physics

Приведены постановка и результаты экспериментов по изоэнтропическому сжатию алюминия в исходном твёрдом низкотемпературном состоянии до давления в несколько мегабар. Полученные экспериментальные точки сопоставляются с данными расчётно-теоретических моделей.

This paper presents geometry and results of experiments on isentropic compression of aluminum in initial solid low-temperature state up to the pressure of some megabar. Obtained experimental points are compared with data of calculation and theoretical models.

На протяжении нескольких последних лет во ВНИИЭФ проводились эксперименты по изоэнтропическому сжатию изотопов водорода – протия и дейтерия, начальное состояние которых соответствовало твёрдотельной фазе [1]. Целью этих экспериментов являлось построение нулевой изотермы этих веществ в области давлений до 5–6 Мбар. Сжатие осуществлялось в устройстве, основными элементами которого являются: генератор сверхсильных магнитных полей типа МК-1 [2], размещаемая в полости генератора цилиндрическая камера сжатия, представляющая собой толстостенную медную обжимающую трубку, закрытую на торцах массивными пробками из вольфрамового сплава, и, наконец, криогенное устройство, состоящее из сосуда с жидким хладагентом (гелием или азотом) и криопровода для подачи хладагента из сосуда к камере сжатия. При проведении опыта исследуемое вещество с помощью криогенного устройства можно предварительно охладить в камере сжатия до требуемой начальной температуры. В камере сжатия между медной трубкой и исследуемым изотопом находилось эталонное вещество с хорошо известным в интересующей нас области высоких давлений и низких температур уравнением состояния. Во время работы МК генератора исследуемый и эталонный образец изоэнтропически сжимались давлением мультимегагауссного

магнитного поля, приложенным к внешней поверхности камеры сжатия.

В один из моментов процесса сжатия производилось рентгенографирование центрального участка (длиной около 10 см) всего устройства сжатия импульсом тормозного излучения бетатрона [3]. По полученному на рентгеновском снимке изображению камеры определяется сжатие исследуемого вещества и эталонного вещества и, следовательно, их плотности в момент снимка. (В начальный момент сжатия все вещества имеют известную начальную плотность.) По плотности эталона, воспользовавшись его известной изоэнтропой, можно определить давление в нём и, тем самым, – в исследуемом веществе (при условии малости радиальных и осевых градиентов давления в центральной части камеры сжатия). Для более точного определения положения границ образцов между исследуемым образцом и эталоном, а также между эталоном и камерой сжатия, помещается контрастер – тонкий слой вещества с большой плотностью и атомным номером. (В качестве контрастера использовался сплав ВНМ, содержащий 95 % вольфрама.) Эталонном являлся алюминий, для которого по результатам ударно-волновых и статических экспериментов накоплен и обработан обширный статистический материал, соответствующий интервалу исследуемых нами «холодных» давлений [4-8]. Эскиз камеры сжатия

приведён на рис. 1. По значению R находим сжатие исследуемого образца, по значениям $R^{(Al)}$ и $R^{(W)}$ находим сжатие алюминия, а воспользовавшись его эталонной изоэнтропой, и давление в нём. Учтя расчётным образом градиентную поправку, получим давление в исследуемом веществе. Значение же внешнего радиуса контрастирующей оболочки $R^{(W)}$, необходимое для вычисления сжатия алюминиевого эталона, находится из условия равенства давлений в эталоне и в контрастирующей оболочке. Расчёты показали, что это условие с хорошей точностью выполняется на большей части импульса сжатия. (Выражение для изоэнтропы вольфрамового сплава было выбрано в виде, рекомендованном в [4]. Значения входящих в него параметров – коэффициентов соответствующего $D(U)$ -соотношения – взяты нами из сборника [9], где они приведены для интересующего нас интервала давлений. Необходимо отметить, что варьирование этих параметров в пределах погрешностей, с которыми они были измерены, на определение радиуса $R^{(W)}$ заметным образом не сказывается.) Применяемая нами в настоящее время методика обработки изображений позволяет достаточно надёжно и точно определить радиус исследуемого образца R и внешний радиус эталона $R^{(Al)}$.

После проведения серии одномерных магнитогидродинамических (МГД), квазидвумерных и двумерных гидродинамических (ГД) расчётов конструкция камеры сжатия, её поперечные и продольные размеры, а также начальное поле B_0 генератора МК-1 были подобраны таким образом, чтобы в процессе сжатия градиенты давления в камере были минимальны, отсутствовали осевые перемещения масс и при этом на рентгеновских снимках получались бы достаточно качественные изображения интересующих нас границ раздела веществ [10, 11].

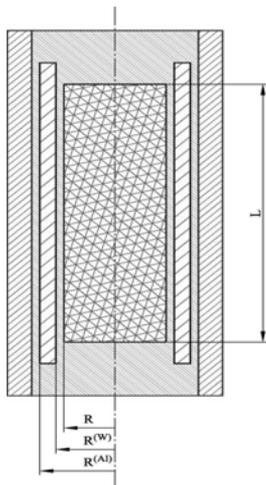


Рис. 1. Эскиз камеры сжатия

Из сказанного ясно, что в применяемой нами методике определения давления решающую роль играет знание изоэнтропы алюминия, которая, в виду низкой начальной температуры эталона, практически совпадает с его нулевой изотермой. За годы, прошедшие со времени первых систематических исследований уравнения состояния (УРС) алюминия, для описания его «холодного» сжатия было предложено немало феноменологических и полуфеноменологических кривых, которые, так или иначе, учитывают как данные статических и динамических экспериментов, так и результаты первопринципных и модельных расчётов. Некоторые из этих кривых [4, 7, 12-18], наиболее часто встречающиеся в литературе, приведены в координатах «давление-сжатие» на рис. 2. (Здесь ρ_{00} – кристаллическая плотность при нулевых давлении и температуре.) Видно, что при давлении ниже 1 Мбар их относительные различия невелики. При более же высоких давлениях, качественно совпадая по форме, представленные нулевые изотермы, тем не менее, заметно отличаются своей «жесткостью». Так, наибольший рост давления с увеличением плотности даёт кривая «холодного» сжатия (штрихпунктирная линия на рис. 2), фигурирующая в так называемом УРС с предельной плотностью [12]. С другой стороны, наиболее «мягкими» являются: нулевая изотерма, предложенная в [13] (сплошная тонкая линия), а также нулевая изотерма, построенная по данным [7] (сплошная толстая линия). Последняя учитывает не только данные ударно-волнового сжатия, в том числе и до экстремально высоких, мультимегабарных, давлений [5, 6], но, что очень важно, результаты измерений скорости звука в статических условиях (на алмазных наковальнях) до давлений в несколько мегабар [7]. Промежуточное положение занимают нулевые изотермы, предложенные в известной работе [4] с использованием потенциала Бэрча-Мурнагана (пунктирная тонкая линия), Борна-Майера (штриховая тонкая линия) и Морзе (на рисунке не показана, так как совпадает с кривой [7]).

Для выбора наиболее адекватной кривой «холодного» сжатия алюминия, которую затем можно было бы использовать для определения давления в исследуемом изотопе водорода, было решено провести серию расчётов, используя в них «холодные» изоэнтропы Al различной «жесткости». По результатам расчётов естественно было бы выбрать для дальнейшего использования ту из них, для которой наблюдается наименьшее расхождение при сопоставлении расчётных результатов с данными рентгенографических измерений. Расчёты проводились с помощью МГД кода «Hz» [9]. Для описания сжимаемости протия и дейтерия в области мегабарных давлений использовалась

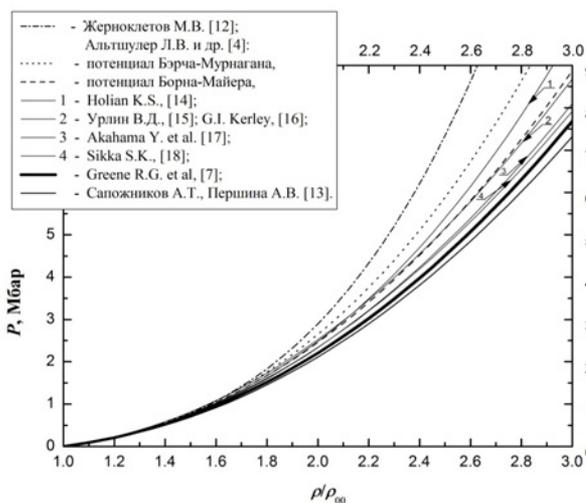


Рис. 2. Экстраполяция нулевых изотерм алюминия, предлагавшихся для построения его уравнения состояния, в область мультимегабарных давлений

«холодная» кривая из [19], полученная на алмазных наковальнях до давления 1,2 Мбар. Расчёты показали, что использование любой другой из предлагавшихся для H₂ или D₂ «холодных» кривых приводит к гораздо меньшему согласию расчётных и экспериментальных данных в независимости от «жесткости» используемой в расчёте изэнтропии Al. Что касается остальных веществ, участвующих в моделировании процесса сжатия, то для описания их уравнений состояния и всех остальных необходимых характеристик (проводимость, модуль сдвига и предел текучести) использовались стандартные выражения из библиотеки, входящей в программный комплекс «Hz».

Сопоставление расчётов с экспериментальными данными [1] проводилось следующим образом (см. рис. 3 и 4). Для каждого из опытов с помощью кода «Hz» рассчитывался процесс, происходящий в центральной части устройства сжатия с учётом значения начального поля B_0 , зарегистрированного в рассматриваемом эксперименте. Выполнялось несколько вариантов расчёта, отличающихся выбором нулевой изотермы алюминия. Для каждого варианта по расчётным зависимостям радиусов исследуемого и эталонного образцов от времени – $R(t)_{расч.}$ и $R^{(Al)}(t)_{расч.}$ – в плоскости $R^{(Al)}-R$ строилась соответствующая «траектория» ($R^{(Al)}-R$ диаграмма). Здесь же наносилась экспериментальная точка ($R^{(Al)}$; R) с указанием погрешностей её измерения.

В расчётах использовались следующие кривые: нулевая изотерма УРС с предельной плотностью [12] (самая «жесткая» из приведённых на рис. 1), «мягкие» изотермы [7, 13], а также занимающие промежуточное положение «холодные» кри-

вые из [4], соответствующие потенциалу Борна-Майера и Бэрча-Мурнагана.¹

Расчётные диаграммы вместе с соответствующей экспериментальной точкой приведены на рис. 3 для двух опытов с H₂, а на рис. 4 – для двух опытов с D₂. (Обозначение каждой из диаграмм на рис. 3–4 совпадает с обозначением соответствующей ей «холодной» кривой Al на рис. 2) Видно, что чем «жестче» фигурирующая в расчёте «холодная» кривая Al, тем дальше отстоит соответствующая ей $R^{(Al)}-R$ диаграмма от экспериментальной точки. Такой же вывод следует и из аналогичных построений, выполненных для всех остальных опытов. Наибольшее согласие с экспериментом наблюдается в тех случаях, когда для описания сжимаемости алюминия используются «холодные» кривые из [7] и [13].

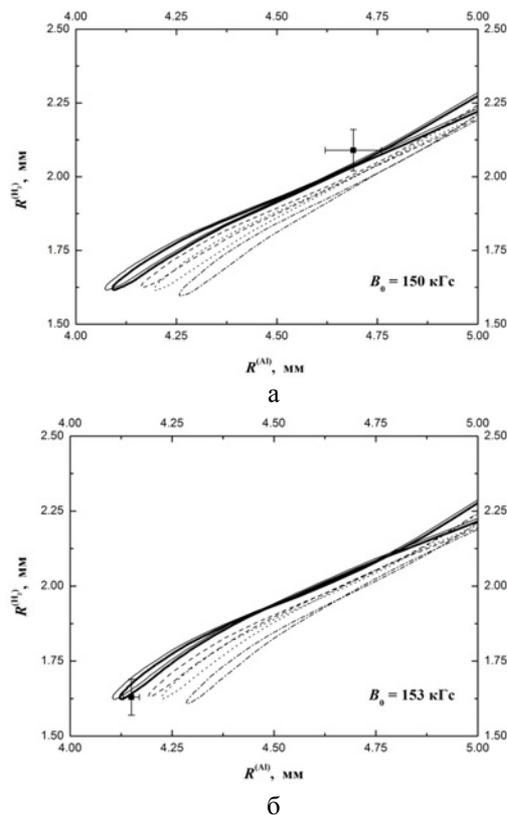


Рис. 3. Сопоставление экспериментальной точки с расчётными диаграммами для двух опытов с H₂: а) – опыт с начальным полем МК-1 генератора, равным 150 кГс; б) – опыт с начальным полем 153 кГс

¹ Нулевая изотерма [4], соответствующая потенциалу Морзе, проходит очень близко от нулевой изотермы [7]. Следовательно, можно ожидать, что соответствующие расчётные $R^{(Al)}-R$ диаграммы будут практически совпадать. Как показали несколько предварительных расчётов, это действительно так. Поэтому при проведении основной расчётной серии кривая, соответствующая потенциалу Морзе не использовалась.

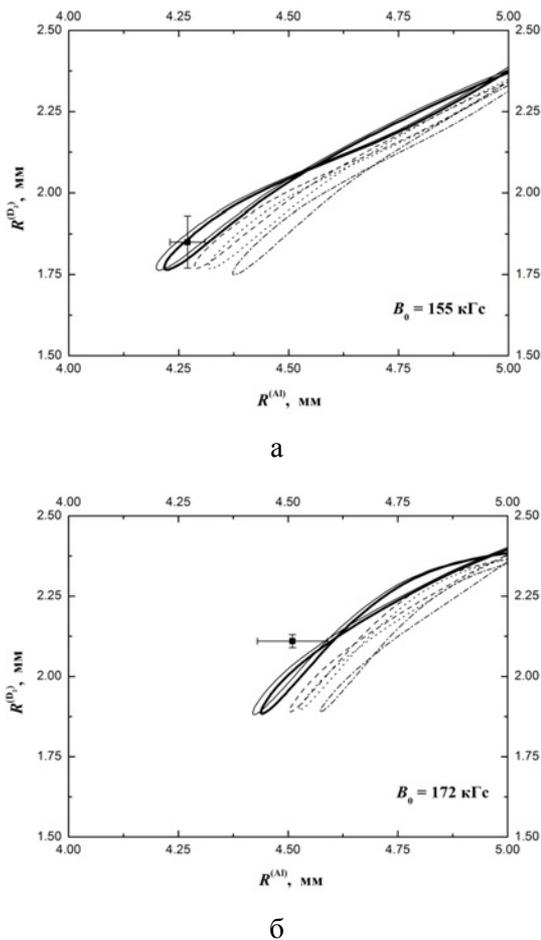


Рис. 4. Сопоставление экспериментальной точки с расчётными диаграммами для двух опытов с D_2 : а) – опыт с начальным полем МК-1 генератора, равным 155 кГс; б) – опыт с начальным полем 172 кГс

Для того чтобы устранить влияние неточности в знании УРС изотопов водорода на поиск «холодной» кривой алюминия, наиболее адекватно описывающей сжимаемость его твёрдой фазы в области мегабарных давлений, проведена дополнительная серия из трёх опытов. Они были аналогичны экспериментам [1], разница лишь в том, что теперь в камере сжатия под датчиком давления вместо исследуемого изотопа водорода находился алюминий, а сама камера предварительно охлаждалась не до гелиевой температуры, а до азотной² или не охлаждалась вовсе. (Последнее вполне допустимо, так как изоэнтропа алюминия, соответствующая начальной температуре, близкой к комнатной ($T_0 \sim 300$ К), и начальному давлению,

близкому к атмосферному ($P_0 \sim 1$ бар), не выходит в исследуемой области давлений (1–5 Мбар) за пределы твёрдой фазы Al, лишь незначительно отклоняясь от нулевой изотермы Al.)

Если рассматриваемое УРС кристаллического алюминия вполне адекватно в указанной области давлений, то $R^{(Al)}$ -R диаграмма, рассчитанная с использованием этого УРС, должна в пределах экспериментальных погрешностей согласовываться с полученной в эксперименте точкой. К настоящему времени обработаны результаты двух из проведённых опытов. Они представлены на рис. 5 в сопоставлении с соответствующими расчётными $R^{(Al2)}$ - $R^{(Al1)}$ диаграммами. Здесь $R^{(Al2)}$ – это внешний радиус эталонного алюминиевого цилиндра, $R^{(Al1)}$ – радиус центрального алюминиевого стержня. (На рис. в рамке приведены их начальные значения, а также начальные значения внешних радиусов обоих контрастеров и камеры сжатия.) Соответствие обозначений всех диаграмм тем или иным «холодным» кривым алюминия такое же, как на предыдущих рисунках, кроме той, что показана штрихованной толстой линией. Последней отвечает изоэнтропа, построенная по данным [7], но она соответствует начальной температуре либо близкой к комнатной (см. рис. 5а), либо азотной (рис. 5б). (Как и следовало ожидать, диаграммы, построенные с использованием результатов [7] и соответствующие гелиевой и азотной начальной температуре – сплошная и пунктирная толстые линии – практически совпадают.)

На рис. 5, как и на двух предыдущих, наблюдается прежняя картина: чем более «жестче» изоэнтропа Al, фигурирующая в расчётах, тем больше расстояние от расчётной диаграммы до экспериментальной точки. При этом кривые, соответствующие работам [7] и [12], согласуются в пределах погрешностей с экспериментальными точками, чего нельзя сказать о диаграммах, полученных с использованием УРС из [4] и [12]. Следовательно, подтверждается вывод о том, что из всех рассмотренных уравнений состояния алюминия наибольшее согласие с экспериментальными результатами дают уравнения, основанные на нулевых изотермах из [7] и [13]. Тем не менее, для дальнейшего использования следует рекомендовать изоэнтропу, построенную по данным исследования [7], учитывающего результаты многочисленных экспериментов по динамическому и статическому сжатию алюминия, выполненных уже после опубликования статьи [13].

² Под гелиевой (азотной) понимается температура кипения жидкого гелия (азота) при атмосферном давлении.

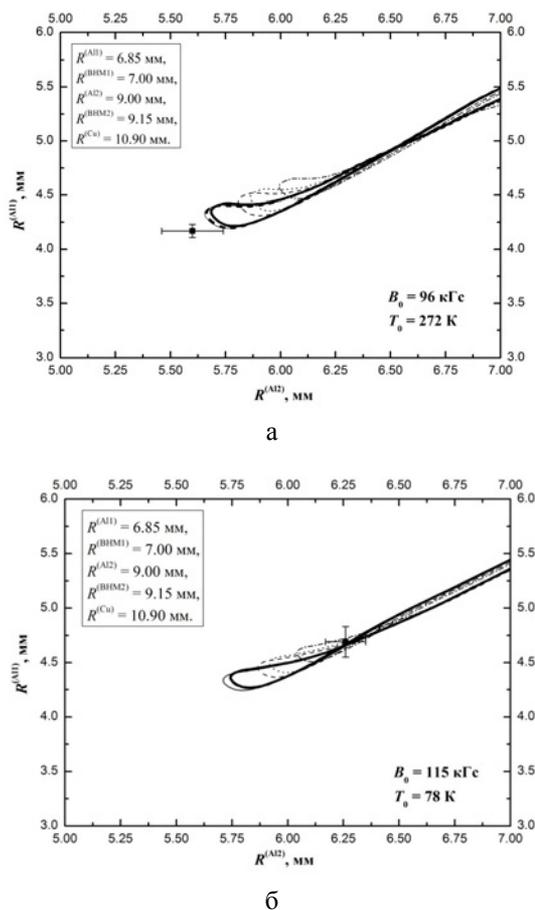
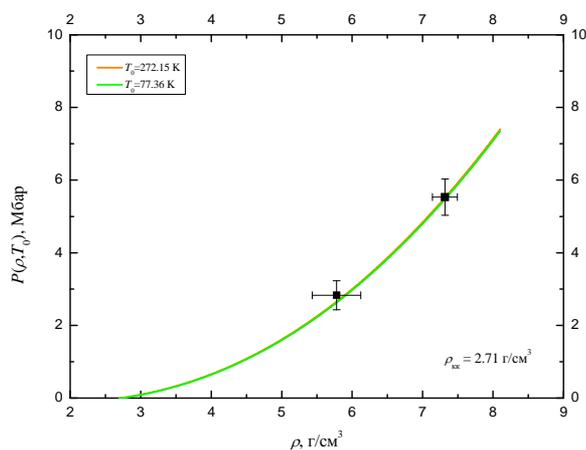


Рис. 5. Сопоставление экспериментальной точки с расчётными диаграммами для двух опытов с Al: а – опыт с начальным полем МК-1 генератора, равным 96 кГс и начальной температурой в камере сжатия, равной 272 К; б – опыт с начальным полем МК-1 генератора, равным 115 кГс и начальной температурой в камере сжатия, равной 78 К

В двух описываемых экспериментах по изложенной в [1] методике были определены сжатие и давление в исследуемом образце (алюминии) с использованием изоэнтропы [7] для описания сжимаемости алюминия в «датчике давления» – верхнем алюминиевом слое. Таким образом, в плоскости P - ρ были построены две экспериментальные точки. Одна из них принадлежит изоэнтропе Al, проходящей через точку, соответствующую начальной температуре $T_0 \approx 272$ К, другая – изоэнтропе, проходящей через точку с $T_0 \approx 78$ К. Если изоэнтропа, построенная на основе работы [7], адекватно описывает сжимаемость алюминия в исследуемой нами области давлений, то полученные экспериментальные точки должны согласовываться с соответствующей этой изоэнтропе кривой. Обе точки вместе с соответствующими им изоэнтропами, построенными на

основе [7], представлены на рис. 6. Наблюдается достаточно хорошее согласие построенных точек и кривых.



Таким образом, для целей измерения давления в исследуемых веществах в экспериментах по изоэнтропическому сжатию вполне подходят изоэнтропы, построенные в соответствии с работой [7].

Список литературы

1. Boriskov G. V., Bykov A. I., Egorov N. I. et al. Isentropic Compression of Substances Using Ultra-High Magnetic Field: Zero Isotherms of Protium and Deuterium in Pressure Range up to ~5 Mbar // *Contrib. Plasma Phys.* 2011. Vol. 51, No 4. P. 339-348; Egorov N. I., Boriskov G.V., Bykov A. I., et al. Use of pulsed radiography for investigation of equations of state of substance at megabar pressures // *Ibid.* P. 333-338.
2. Павловский А. И., Долотенко М. И., Колокольчиков Н. П. и др. Каскадный магнитокумулятивный генератор сверхсильных магнитных полей. В кн.: Сверхсильные магнитные поля. Физика. Техника. Применение. // Тр. Третьей международной конференции по генерации мегагауссных магнитных полей и родственными экспериментам / Под ред. В. М. Титова, Г. А. Швецова. М.: Наука, 1984. С. 19-22.
3. Павловский А. И., Кулешов Г. Д., Склизов Г. В. и др. Сильноточные безжелезные бетатроны // *ДАН СССР.* 1965. Т. 160, № 1. С. 68-70; Kuropatkin Y. P., Mironenko V. D., Suvorov V. N., and Volkov A. A. Characteristics of the installation for flash radiography based on the uncored betatron BIM – M. In: 11th IEEE Pulsed Power Conference // *Digest of technical papers / Eds. G. Cooperstein and I. Vitkovitsky.* Piscataway NJ USA, IEEE, 1998. P. 1663-1668.

4. Альтшулер Л. В., Брусникин С. Е., Кузьменков Е. А. Изотермы и функции Грюнайзена 25 металлов // ЖПМТФ. 1987, №1 С. 134-146.
5. Симоненко В. А., Волошин Н. П., Владимиров А. С. и др. Абсолютные измерения ударной сжимаемости алюминия при давлениях $P \geq 1$ ТПа. // ЖЭТФ. 1985. Т. 88, № 4. С. 1452-1459.
6. Nellis W. J., Moriarty J. A., Mitchell A. C. et al. Physics at ultrahigh pressure: aluminum, copper, and lead as prototypes // Phys. Rev. Let. 1988. V. 60, P. 1414-1417.
7. Greene R. G., Lue H., and Ruoff A. L. Al as a simple solid: high pressure study to 220 GPa (2.2 Mbar) // Phys. Rev. Let. 1994. V. 73, P. 2075-2078.
8. Калиткин Н. Н., Кузьмина Л. В. Широкодиапазонные ударные адиабаты. В кн.: Ударные волны и экстремальные состояния вещества. М. Наука / Под ред. Фортова В. Е., Альшулера Л. В., Трунина Р. Ф., Футикова А. И. М.: Наука, 2000, С. 107-120.
9. Трунин Р. Ф., Гударенко Л. Ф., Жерноклетов М. В., Симаков Г. В. Экспериментальные данные по ударно-волновому сжатию и адиабатическому расширению конденсированных веществ: Научное издание / Под ред. Р. Ф. Трунина. Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2006.
10. Борисков Г. В., Тимарева В. И. Моделирование процесса изоэнтропического сжатия водорода в одномерном МГД приближении и оптимизация устройства сжатия. В кн.: VIII Харитоновские чтения по проблемам физики высоких плотностей энергии // Сборник докладов. ФГУП РФЯЦ-ВНИИЭФ, Саров, 2006. С. 516-524.; Борисков Г. В., Тимарева В. И. Расчёт аксиальных течений дейтерия, изоэнтропически сжатого до мегабарных давлений // Ibid С. 509-515.
11. Борисков Г. В., Тимарева В. И., Соколов С. С. Применение двумерного гидродинамического кода для расчёта процесса изоэнтропического сжатия конденсированных изотопов водорода. В кн.: Мощные лазеры и исследования физики высоких плотностей энергии // X Харитоновские чтения по проблемам физики высоких плотностей энергии / Под ред. С. Р. Гаранина. РФЯЦ-ВНИИЭФ, Саров, 2008. С. 285-289.
12. Методы исследования свойств материалов при интенсивных динамических нагрузках. Монография / Под общей редакцией д-ра физ. мат. наук М. В. Жерноклетова. Саров, 2003.
13. Сапожников А. Т., Першина А. В. ВАНТ, серия: «Методы и программы численного решения задач математической физики», 1984. №2. С. 29-33.
14. Holian K. S. A new equation of state for aluminum // J. Appl. Phys. 1986. V. 59, P. 149-157.
15. Urlin V. D. Melting at super high pressures, realized in shock wave // JETP. 1965. V. 49, P. 485-491.
16. Kerley G. I. Theoretical equation of state for aluminum // Int. J. Impact Engng. 1987. V. 5, P. 441-449.
17. Akahama Y., Nishimura M, Kinoshita K, and Kawamura H. Evidence of a fcc-hcp transition in aluminum at multimegabar pressure // Phys. Rev. Let. 2006. V. 96, P. 045505(4).
18. Sikka S. K. Empirical equation of state theories at ultra-high pressures // Phys. Let. A. 1989. Loubeyre P., LeToullec R., Hausermann D., Hanfland M., Hemley R. J., Mao H. K., and Finger L. W. X-ray diffraction and equation of state of hydrogen at megabar pressures // Nature. 1996. V. 383, P. 702-704.