

## Квазиизэнтропическое сжатие плотного газообразного гелия в области давлений до 500 ГПа

М. В. Жерноклетов, В. К. Грязнов<sup>\*1)</sup>, В. А. Аринин, В. Н. Бузин, Н. Б. Давыдов, Р. И. Илькаев,  
И. Л. Иосилевский<sup>+×</sup>, А. Л. Михайлов, М. Г. Новиков, В. В. Хрусталеv, В. Е. Фортv<sup>\*+</sup>

Российский федеральный ядерный центр – Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики,  
607190 Саров, Россия

<sup>\*</sup> Институт проблем химической физики РАН, 142432 Черноголовка, Россия

<sup>+</sup> Объединенный институт высоких температур РАН, 125412 Москва, Россия

<sup>×</sup> Московский физико-технический институт, 141700 Долгопрудный, Россия

Поступила в редакцию 26 июня 2012 г.

После переработки 21 августа 2012 г.

Представлены результаты измерения термодинамических параметров квазиизэнтропически сжатого гелия в диапазоне давлений 100–500 ГПа. Зафиксированы давление и плотность. Предложена термодинамическая модель, которая позволяет удовлетворительно описать поведение сильно сжатого гелия в широком диапазоне параметров сжатия.

**Введение.** Интерес к исследованию термодинамических свойств гелия при высоких давлениях и температурах связан с его широким распространением в природе, применением в различных высокоэнергетических устройствах, а также с активно ведущимся исследованием процессов в недрах планет-гигантов и так называемых внесолнечных планет [1, 2]. К настоящему времени экспериментальные исследования термодинамических свойств гелия в субмегабарном и мегабарном диапазоне динамических давлений ограничены несколькими работами [3–5], в которых конечное состояние ударно [3, 5] или квазиизэнтропически [4] сжатого гелия достигалось при помощи легкогазовых пушек [3], мощных взрывных устройств [4] или мощных лазеров [5]. В работе [3] были получены данные как за прямой, так и за отраженной ударной волной. Теоретическое описание термодинамических свойств гелия в мегабарном диапазоне динамических давлений, где высокая плотность вещества, возможно, сопровождается сильным кулоновским взаимодействием заряженных частиц (сильно неидеальная плазма), было предложено как в рамках квазихимического представления (химическая модель плазмы, модель свободной энергии) [6–8], так и с помощью “первоприципных” методов, использующих прямое численное моделирование сильно взаимодействующей системы ядер и электронов [9, 10]. Однако ввиду того, что как экспериментальные, так и теоретические результаты на данный момент име-

ют фрагментарный характер, дальнейшее изучение свойств гелия в этой области параметров имеет большое значение. В частности, возникает вопрос о возможности фазового перехода при высоких степенях сжатия [6–8]. Генерировать состояния с давлениями мегабарного диапазона позволяют мощные взрывные устройства цилиндрической и полусферической геометрии, разработанные во ВНИИЭФ.

**Экспериментальная методика.** Конструкция двухкаскадного устройства для исследования сжимаемости газов, приведенная ранее схематично в [11, 12], показана на рис. 1. Для сжатия газа 1 в камере высокого давления (КВД) использовались цилиндрические экспериментальные устройства 2 со взрывчатыми веществами (ВВ) из сплава тротил/гексоген 40/60 с массой  $\approx 16$  и  $\approx 24$  кг. Инициирование наружной поверхности ВВ производилось одновременно в 640 точках. Заполнение экспериментальных устройств гелием (объемная доля гелия – не менее 99.99%) проводилось из обычного баллона со сжатым газом. Исходная температура газа измерялась термомпарами. По измеренному значению температуры рассчитывалось необходимое начальное давление из условия, что начальная плотность гелия во всех опытах должна быть одинаковой и составлять величину  $0.019 \text{ г/см}^3$  ( $P_0 \approx 120$  атм). Давление газа в КВД контролировалось образцовым манометром. Плавное сжатие гелия в центральной части конструкции осуществлялось внутренней оболочкой из стали 3 за счет введения смягчающего слоя газа между ней и внешней герметизирующей оболочкой, изготовленной из

<sup>1)</sup> e-mail: grvk@icp.ac.ru

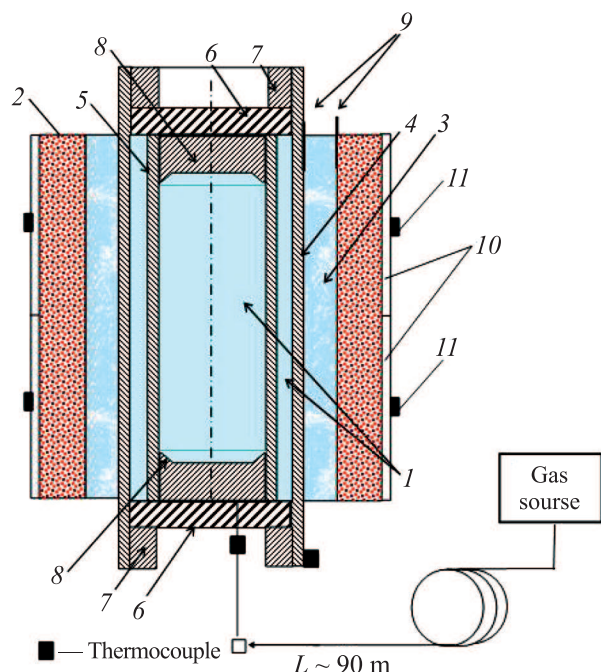


Рис. 1. Экспериментальное устройство для исследования сжатия газообразных гелия и дейтерия: 1 – исследуемый газ, 2 – блок ВВ, 3 – полиэтилен (или оргстекло), 4 – внешняя оболочка, 5 – внутренняя оболочка, 6 – заглушки, 7 – гайки, 8 – вставки, 9 – контакты, 10 – распределители, 11 – электродетонатор

стали 45. С той же целью смягчения процесса сжатия между ВВ и внешней оболочкой располагалась оболочка из полиэтилена. Начальное давление газа в обеих полостях камеры было одинаковым. Варьирование конечной степени сжатия газа достигалось путем изменения диаметра внутренней оболочки и массы ВВ.

В экспериментах с помощью источников рентгеновского излучения в разные моменты времени регистрировались положения границ стальных оболочек для каждого цилиндрического устройства. По точкам на траектории движения внутренней границы внутренней оболочки определялся радиус полости оболочки в момент максимального сжатия, называемый далее моментом “остановки” оболочки. Давление в эксперименте определялось расчетным путем из сопоставления расчетных и экспериментальных данных по положению границ оболочки во времени, откуда делались выводы о достигнутых параметрах сжатия газа. Рентгенографирование оболочек проводилось двумя независимо работающими источниками рентгеновского излучения, оси которых располагались под углом  $135^\circ$  друг к другу, в

два различных момента времени с интервалом 1–3 мкс. Для регистрации рентгеновского изображения оболочек использовалась система диагностики, включающая АДС-комплекс для цифровой рентгенографии [13]. Этот метод основан на использовании радиографических экранов с фотохромным покрытием. Под действием рентгеновского излучения в них образуется скрытое изображение, которое затем визуализируется в считывающем устройстве и подвергается цифровой обработке. Метод обладает существенным преимуществом перед использованием рентгеновских пленок, обеспечивая более высокую чувствительность регистрации и высокое пространственное разрешение. Для увеличения квантовой эффективности при регистрации рентгеновских изображений использовалось одновременно по десять сложенных вместе в виде стопки АДС-экранов. На этапе цифровой обработки изображения, зарегистрированные каждым отдельным экраном, суммировались [14]. При обработке экспериментальных рентгенограмм применялся денситометрический функциональный метод [15] с последующим компьютерным анализом полученных данных. Сущность метода заключается в экстраполяции приграничных функций, лежащих по обеим сторонам от границы. Точка их пересечения принимается за границу. Пример обработки этим методом динамического рентгеновского изображения оболочек цилиндрического устройства приведен на рис. 2.

В общей сложности было проведено 8 опытов, по 2 на каждом типе устройств. Расчеты движения оболочек выполнялись по одномерным и двумерным газодинамическим программам. В расчетах для элементов конструкций и ВВ использовались уравнения состояния (УРС), введенные в газодинамический расчетный комплекс ВНИИЭФ. Для гелия использовалось уравнение состояния в табличной форме, разработанное на основе модифицированной модели сжимаемого коволюма [16, 17]. Сравнение результатов эксперимента и расчетов по одномерным и двумерным программам свидетельствует об их согласованности в пределах погрешности измерения. На рис. 3 в качестве примера приведены экспериментальные точки по двум опытам серии  $S_4$ .

“Мягкое” квазиизэнтропическое сжатие гелия осуществлялось из состояний, достигнутых во время сжатия в первой ударной волне при радиусе внутренней оболочки  $R = 2/3R_0$ , что соответствовало массовым скоростям гелия за первой ударной волной  $u = 2.34, 3.12, 2.83$  и  $3.83$  км/с для экспериментальных серий  $S_1$ – $S_4$  соответственно. Средняя плотность газа  $\rho$  в момент полной остановки (максимальное

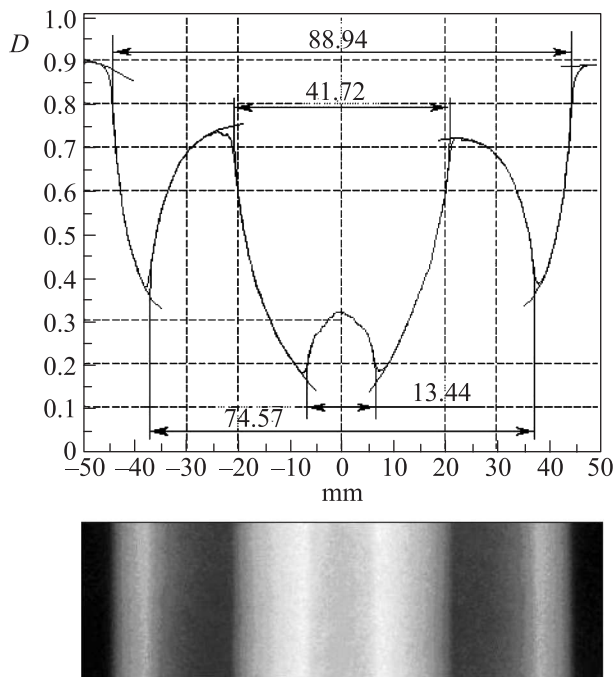


Рис. 2. Участок взрывного снимка и его трассировка для опыта из серии S<sub>4</sub> (D – плотность почернения в условных единицах)

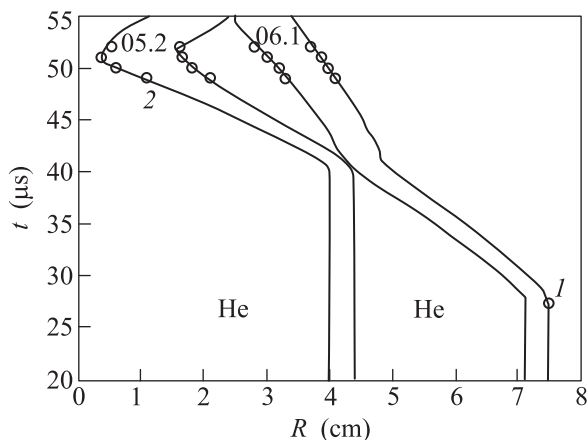


Рис. 3. Диаграммы движения оболочек в экспериментах S<sub>4</sub>. Цифрами 1 и 2 обозначены точки, соответствующие временам t<sub>1</sub> (время прихода ударной волны на внешнюю оболочку первого каскада) и t<sub>2</sub> (время первого рентгенографирования). Кружки – эксперимент, линии – расчет

сжатие) определялась исходя из предположения, что масса газа сохраняется:

$$\rho = \rho_0 (R_0/R_{st})^2. \quad (1)$$

Среднее давление в газе в момент максимального сжатия определялось усреднением его значений по всем счетным точкам. В табл.1 приведены значе-

ния массовой скорости в первой ударной волне, минимальных радиусов оболочек в момент их остановки, соответствующие этим радиусам средние экспериментальные плотности газа и полученные в результате численного моделирования давления для каждой экспериментальной серии.

Таблица 1

Массовые скорости в первой ударной волне, минимальные радиусы оболочек и параметры квазиизэнтропически сжатого гелия

Серия	u, км/с	R <sub>st</sub> , мм	ρ, г/см <sup>3</sup>	P, ГПа
S <sub>1</sub>	2.34	6.36±0.11	1.32±0.05	126±10
S <sub>2</sub>	2.83	5.64±0.14	1.68±0.08	240±27
S <sub>3</sub>	3.12	4.18±0.06	1.74±0.05	246±15
S <sub>4</sub>	3.83	3.73±0.06	2.19±0.07	460±34

**Сравнение с результатами теоретических расчетов.**

Расчет проводился в рамках модифицированной химической модели плазмы [18, 19] с использованием кода SANA-He. В рамках этой модели гелий рассматривается как сильно неидеальная смесь ионов, электронов и атомов. При расчете равновесного состава плазмы и ее термодинамических свойств учитываются эффекты частичного вырождения электронной компоненты и взаимодействия между всеми сортами частиц. Для описания кулоновской неидеальности используется вариант модифицированного псевдопотенциального подхода с учетом многократной ионизации [20, 19]. В рамках этой модификации эффективное электрон-ионное взаимодействие описывается кулоновским потенциалом, исправленным на близких расстояниях и конечным в нуле (псевдопотенциал Глаубермана [21]). Его эффективная глубина соответствует значению энергии взаимодействия электрон-ионной пары на среднем расстоянии между тяжелыми частицами (ионами и атомами). Эта же величина в данной модели соответствует граничной энергии, разделяющей свободные и связанные (внутриатомные) состояния, учитываемые при расчете атомных статистических сумм. Наряду с вкладом кулоновского взаимодействия заряженных частиц учитывается эффект интенсивного отталкивания тяжелых частиц на близких расстояниях [19, 22]. Учет осуществляется с использованием уравнения состояния “мягких сфер” [23], модифицированного для смеси частиц разных диаметров. При этом степень “мягкости” в указанном потенциале межатомного отталкивания и характерный размер атомов выбираются исходя из требования наилучшего соответствия экспериментально полученно-

му уравнению состояния жидкого гелия. Соотношения размеров атома и иона гелия определяются из расчета их электронной структуры методом Хартри–Фока [19]. Для коррекции уравнения состояния гелия в области низких температур и высоких плотностей в модели SAHA-He, помимо вклада короткодействующего отталкивания, дополнительно введен эффект, учитывающий энергию связи конденсированного состояния [24, 25]. Это позволяет обеспечить приемлемое описание поведения гелия при  $T = 0$  К. Предлагаемая модель, на наш взгляд, дает возможность построить качественную картину поведения гелия в мегабарном диапазоне квазиизэнтропического сжатия, обеспечивая описание основных каналов проявления сильного межчастичного взаимодействия, не исключая при этом и количественного описания термодинамических характеристик сильно сжатого гелиевого флюида в перекрытой экспериментом области давлений и плотностей.

**Обсуждение результатов.** Результаты настоящих экспериментов представлены в табл. 1 и на рис. 4. На последнем в координатах  $P$ – $\rho$  приведены

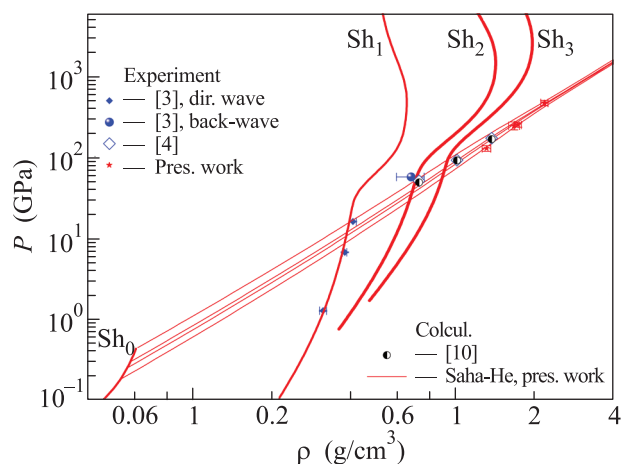


Рис. 4. Квазиизэнтропическое сжатие гелия. Сравнение экспериментальных данных для серий экспериментов  $S_1$ – $S_4$  с расчетными изэнтропами по модели SAHA-He. Результаты эксперимента [4] и расчета методом DFT-MD взяты из [10]. Ударно-сжатый гелий – эксперимент [3] (прямая и отраженная ударная волна). Расчет по модели SAHA-He ( $Sh_0$  – ударная адиабата первичного сжатия гелия  $P_0 = 120$  атм,  $Sh_1$ ,  $Sh_2$ ,  $Sh_3$  – параметры ударно сжатого жидкого гелия за падающей, первой и второй отраженной ударной волной)

значения плотностей и давлений, отвечающие квазиизэнтропическому сжатию гелия в четырех сериях экспериментов, соответствующих разным цилиндрическим конструкциям. Там же приведены данные [3] по однократному и двукратному ударному сжатию

жидкого гелия, а также представленные в [10] данные [4] по квазиизэнтропическому сжатию гелия. Кроме того, на рис. 4 приведены параметры гелия на ударной адиабате первоначального сжатия из состояния  $\rho_0 = 0.019$  г/см<sup>3</sup>,  $P_0 = 120$  атм и изоэнтропы гелия, рассчитанные в рамках модели SAHA-He из состояний, соответствующих на радиусе  $R = 2/3R_0$  массовым скоростям  $u = 2.34, 3.12, 2.83$  и  $3.83$  км/с за фронтом первой ударной волны. На этом же рисунке для сравнения представлены ударная адиабата жидкого гелия, а также кривые для однократно и двукратно отраженной ударной волны, рассчитанные в рамках модели Saha-He с учетом реальной сжимаемости материала экрана (Al). Также на рисунке представлены параметры изэнтропического сжатия, рассчитанные в [10] для начальных плотностей и давлений, соответствующих условиям эксперимента [4]. Следует отметить одновременное очень хорошее соответствие результатов расчета изэнтропического сжатия гелия в рамках модели Saha-He и результатов настоящих экспериментов, а также соответствие результатов расчета ударного сжатия гелия за прямой и отраженной волной и данных экспериментов [3]. Согласно расчетам Saha-He изэнтропы гелия в исследованном диапазоне параметров достаточно хорошо описываются уравнением политропы  $P/\rho^\gamma = \text{const}$  с показателем  $\gamma \approx 2.0$ . В соответствии с проведенными нами расчетами при квазиизэнтропическом сжатии реализуются состояния плотной, сильно неидеальной, частично ионизованной и частично вырожденной плазмы (см. табл. 2). При этом поведение гелия значительно отличается от идеально-газового. Уже в состояниях на ударной адиабате первоначального сжатия, являющихся начальными точками для квазиизэнтропического сжатия в области параметров, откуда берут начало изоэнтропы, величина фактора сжимаемости гелия ( $PV/RT$ ) примерно равна 1.3. Она значительно отличается от аналогичного значения для одноатомного идеального газа ( $PV/RT_{id} = 1$ ). Ввиду того, что степень ионизации на ударной адиабате первоначального сжатия мала, уже в этом случае значительную роль играет межчастичное отталкивание. Как видно из табл. 2, в конечных точках изэнтропического сжатия фактор сжимаемости достигает очень высоких значений ( $\sim 2.7$ – $2.9$ ). Подсистема свободных электронов является частично вырожденной. Параметр вырождения  $n_e \lambda_e^3 \sim 1.8$  (табл. 2). При этом кулоновская подсистема является сильно неидеальной ( $\Gamma_D \gg 1$ ). Таким образом, в соответствии с проведенными в настоящей работе расчетами по модифицированной химической модели плазмы при ква-

Таблица 2

Параметры квазиизэнтропически сжатого гелия. Расчет по модели SAHA-He для серий экспериментов  $S_1$ – $S_4$

Серия	Начальные параметры сжатия				Конечные параметры сжатия							
	$S_0$ , Дж/г·К	$\rho_0$ , г/см <sup>3</sup>	$P_0$ , ГПа	$T_0$ , К	$P$ , ГПа	$\rho$ , г/см <sup>3</sup>	$T$ , 10 <sup>3</sup> К	$\frac{n_e}{n_a + n_i}$	$\Gamma_D$	$n_e \lambda_e^3$	$E$ , кДж/г	$\frac{PV}{RT}$
$S_1$	23.0	0.0534	0.174	1176	126	1.30	17	$2 \cdot 10^{-4}$	1.0	0.008	830	2.74
$S_2$	23.8	0.0567	0.241	1553	240	1.64	24.8	$8.4 \cdot 10^{-3}$	4.0	0.22	1300	2.83
$S_3$	24.3	0.0583	0.286	1811	246	1.63	26.7	$1.5 \cdot 10^{-2}$	4.7	0.34	2900	2.73
$S_4$	25.3	0.0612	0.416	2550	460	2.14	35.6	$9.2 \cdot 10^{-2}$	8.7	1.8	4300	2.9

зиизэнтропическом сжатии реализуются состояния плотной, сильно неидеальной, частично ионизованной и частично вырожденной плазмы гелия.

**Заключение.** В настоящей работе с использованием цилиндрических взрывных генераторов значительно по сравнению с имеющимися экспериментами увеличен диапазон измерений параметров квазиизэнтропического сжатия гелия. Достигнуты и измерены давления квазиизэнтропического сжатия гелия от 130 до 460 ГПа при плотностях от 1.3 до 2.3 г/см<sup>3</sup> и рекордных степенях сжатия  $\delta = \rho/\rho_0$  (до 120). Развита в данной работе теоретическая модель для уравнения состояния плотной гелиевой плазмы позволяет представить качественную картину состояния сильно сжатого гелия в мегабарном диапазоне давлений. Она демонстрирует хорошее согласие с результатами экспериментов, по точности не уступающее результатам сложных первопринципных подходов. Расчеты настоящей работы описывают гелий в экспериментально достигнутой области параметров как плотную, сильно неидеальную плазму с заметной степенью вырождения электронов.

Работа выполнена при финансовой поддержке корпорации Росатом и программы Президиума РАН “Теплофизика и механика экстремальных энергетических воздействий”.

1. R. Redmer, B. Holst, H. Juranek et al., *J. Phys. A* **39**, 4479 (2006).
2. N. Nettelmann, B. Holst, A. Kietzmann et al., *Astrophys. J.* **683**, 1217 (2008).
3. W. J. Nellis, N. C. Holmes, A. C. Mitchell et al., *Phys. Rev. Lett.* **53**, 1248 (1984).
4. V. Ya. Ternovoi, A. S. Filimonov, A. A. Pyalling et al., in *Shock Compression of Condensed Matter – 2001* (ed. by M. D. Furnish, N. N. Thadhani, and Y. Horie), 2002, p. 107.

5. J. Eggert, S. Brygoo, P. Loubeyre et al., *Phys. Rev. Lett.* **100**, 124503 (2008).
6. D. Saumon, G. Chabrier, and H. M. VanHorn, *Astrophys. J. Supplement Series* **99**, 713 (1995).
7. C. Winisdoerffer and G. Chabrier, *Phys. Rev. E* **71**, 026402 (2005).
8. V. Schwarz, H. Juranek, and R. Redmer, *Phys. Chem. Chem. Phys.* **7**, 1990 (2005).
9. B. Militzer, *Phys. Rev. Lett.* **97**, 175501 (2006).
10. A. Kietzmann, B. Holst, R. Redmer et al., *Phys. Rev. Lett.* **98**, 190602 (2007).
11. Р. И. Илькаев, В. Е. Фортов, А. С. Буланников и др., *V Харитоновские чтения* (под ред. А. Л. Михайлова), Саров: ВНИИЭФ, 2005, с. 108.
12. V. E. Fortov, R. I. Ilkaev, V. A. Arinin et al., *Phys. Rev. Lett.* **99**, 185001 (2007).
13. В. А. Аринин, Б. И. Ткаченко и др., *XI Харитоновские чтения* (под ред. А. Л. Михайлова), Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2009, с. 791.
14. V. A. Arinin and B. I. Tkachenko, *Pattern Recognition and Image Analysis* **19**, 63 (2009).
15. В. А. Аринин, *X Забабахинские чтения* (под ред. Забабахина), Снежинск: РФЯЦ-ВНИИТФ, ХХХ, 2010.
16. В. П. Копышев, *ЖПМТФ* **10**, 1304 (1971).
17. В. П. Копышев, В. В. Хрусталева, *ЖПМТФ* **1**, 122 (1980).
18. W. Ebeling, *Physica* **43**, 293 (1969).
19. В. Е. Фортов, В. Я. Терновой, М. В. Жерноклетов и др., *ЖЭТФ* **124**, 288 (2003).
20. И. Л. Иосилевский, *Теплофиз. выс. темп.* **18**, 447 (1980).
21. А. Е. Глауберман, *ДАН СССР* **78**, 883 (1951).
22. V. K. Gryaznov and I. L. Iosilevskiy, *J. Phys. A* **42**, 214007 (2009).
23. D. Young, UCRL-52352, LLNL, Univ. California, 1977.
24. В. К. Грязнов, М. В. Жерноклетов, И. Л. Иосилевский и др., *ЖЭТФ* **114**, 1242 (1998).
25. B. Holst, R. Redmer, V. K. Gryaznov et al., *Eur. Phys. J. D* **66**, 104 (2012).