Письма в ЖЭТФ, том 108, вып. 10, с. 692 – 696 © 2018 г. 25 ноября

Измерение квазиизэнтропической сжимаемости газообразного гелия при давлении ~ 10 ТПа

М. А. Мочалов[+1)], Р. И. Илькаев[+], В. Е. Фортов[*], А. Л. Михайлов[+], В. А. Аринин[+], А. О. Бликов[+], В. А. Огородников[+], А. В. Рыжков[+], В. А. Комраков[+], И. П. Максимкин[+]

[+]Российский Федеральный ядерный центр – Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики (РФЯЦ-ВНИИЭФ), 607188 Саров, Россия

[*]Объединенный институт высоких температур РАН, 125412 Москва, Россия

Поступила в редакцию 20 сентября 2018 г.

С использованием сферической двухкаскадной камеры и заряд взрывчатого вещества с массой $M \approx 85$ кг в тротиловом эквиваленте неидеальная плазма гелия сжата до плотности $\rho \sim 9\,\text{г/см}^3$ давлением $P \sim 10000$ ГПа. Эксперимент выполнен на рентгенографическом комплексе с использованием одновременно трех бетатронов с граничной энергией ≈ 60 МэВ и многоканальной оптико-электронной системы регистрации рентгеновских изображений. Давление сжатого гелия определено по результатам газодинамического расчета.

DOI: 10.1134/S0370274X18220022

Введение. Динамический метод создания высоких давлений с использованием энергии мощных ударных волн широко используется до сих пор для изучения сжимаемости неидеальной плазмы благородных газов, азота, дейтерия, гелия и других газов в области давлений мегабарного и гигабарного диапазонов. Для достижения давлений указанного диапазона во ВНИИЭФ разработаны устройства цилиндрической и сферической геометрии, в которых реализован принцип квазиизэнтропического сжатия плазмы последовательностью падающих и отраженных ударных волн небольшой амплитуды, что позволяет существенно повысить значения давлений сжатия при значительном снижении необратимого нагрева, по сравнению с однократным ударно-волновым нагружением. Используя данный метод, в течение 2007–2018 гг. во ВНИИЭФ исследовали квазиизэнтропическую сжимаемость плазмы дейтерия и гелия при давлениях до ~ 12 ТПа [1–9].

В экспериментах с гелием при равном начальном давлении газа в обоих каскадах ~ 25 МПа исследовались свойства плазмы гелия, сжатой до плотности $\sim 8\,\text{г/см}^3$ давлением ~ 4800 ГПа в [3–5]. Полученные состояния сильно-неидеальной плазмы гелия характеризуются высокими значениями кулоновской неидеальности $\Gamma_d \sim 20$ и параметра вырождения $n\lambda^3 \sim 20$. Свойства квазиизэнтропически сжатой плазмы гелия при высоких степенях сжатия в ~ 600 и 900 раз до давлений ~ 3000–4000 ГПа исследованы в [6–7].

Интерес к исследованию свойств гелия при давлениях выше 100 ГПа во многом связан с предсказаниями существования фазовых переходов первого рода и плазменных переходов в сжатом флюиде [10]. До настоящего времени область давлений, где были предсказаны фазовые переходы и металлизация гелия, оставалась недоступной для исследователей.

В настоящей работе представлен новый результат по сжимаемости неидеальной плазмы гелия до плотности $\sim 9\,\text{г/см}^3$ в сферической конструкции, разработанной и использованной ранее при исследовании сжимаемости дейтерия давлением ~ 12 ГПа в [9]. Эксперимент настоящей работы является логическим продолжением исследований квазиизэнтропической сжимаемости гелия, выполненных в последние годы во ВНИИЭФ.

Измерение квазиизэнтропической сжимаемости газообразного гелия. Для исследования сжимаемости гелия в заявленной области давлений использовано двухкаскадное экспериментальное устройство, аналогичное примененному ранее при исследованиях сжимаемости дейтерия в [9]. Основу конструкции (рис. 1) составляет заполненная гелием сферическая камера, состоящая из двух оболочек *1* и *2*, изготовленных из высокопрочной стали методом пайки из двух полусфер каждая [11, 12]. Для сжатия газа, как и в [9], использован заряд взрывчатого вещества (ВВ) *3* на основе октогена с массой 85 кг в тротиловом эквиваленте.

1)e-mail: postmaster@ifv.vniief.ru

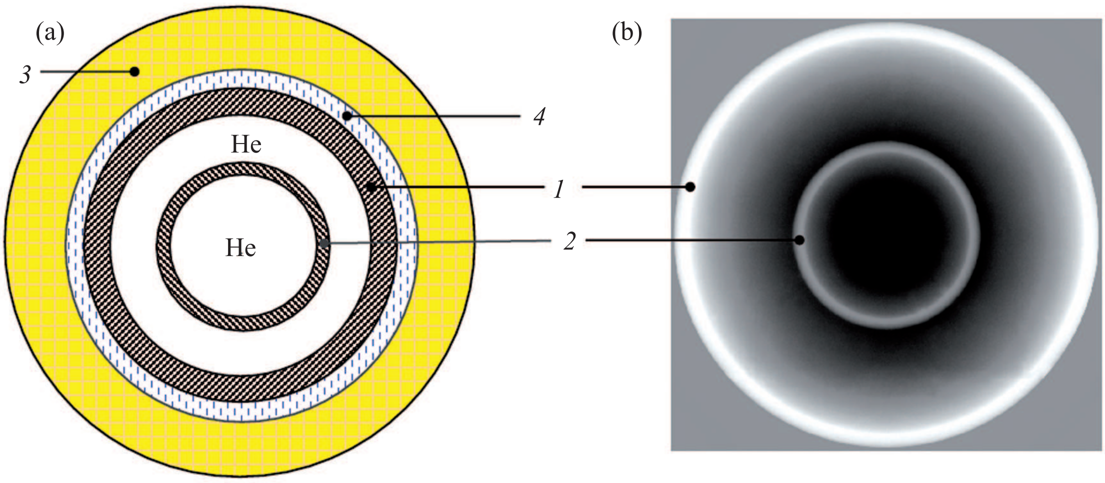

Рис. 1. (Цветной онлайн) Двухкаскадное сферическое экспериментальное устройство. (a) – Схема конструкции. (b) – Рентгенограмма устройства в исходном состоянии: *1* – внешняя оболочка (Fe1); *2* – внутренняя оболочка (Fe2); *3* – ВВ; *4* – оргстекло

Для заполнения экспериментального устройства газообразным гелием использован термокомпрессионный источник гелия. По результатам масс-спектрометрических анализов доля гелия в заправленном в источник газе составляет 99.96–99.97 %. Величина начального давления газа в процессе заполнения измерялась датчиком S-10 фирмы WIKA (класс точности 0.25). Температура газа контролировалась хромель-алюмелевой термопарой, расположенной внутри трубопровода, использованного для напуска газа. Давление газа в полостях оболочек *1* и *2* (рис. 1) было одинаковым. Начальная плотность гелия ρ_0 рассчитывалась по измеренным значениям давления и температуры с использованием справочных данных [13]: $P_0 = 218\,\text{кгс/см}^2$, $T_0 = -17\,°\text{C}$, $\rho_0 = 0.0365\,\text{г/см}^3$.

Основная особенность двухкаскадных конструкций, использованных нами ранее в экспериментах с дейтерием и гелием [1–9], а также в настоящей работе, заключается в том, что металлогазовая смесь, возникающая при выбросе частиц металлической пыли из внешней оболочки *1*, оказывается локализованной между полостями оболочек *1* и *2* (рис. 1) и не проникает во внутреннюю полость оболочки *2*, где измеряется сжимаемость чистого газа.

Теневое изображение границ оболочек, сжимающих исследуемый газ, получено при одновременном использовании тормозного излучения трех мощных бетатронов *1* (рис. 2) с граничной энергией электронов ≈ 60 МэВ [14], расположенных под углами 45° друг к другу в защитном бетонном сооружении *2*, работающих в режиме последовательной генерации трех импульсов рентгеновского излучения (рис. 2).

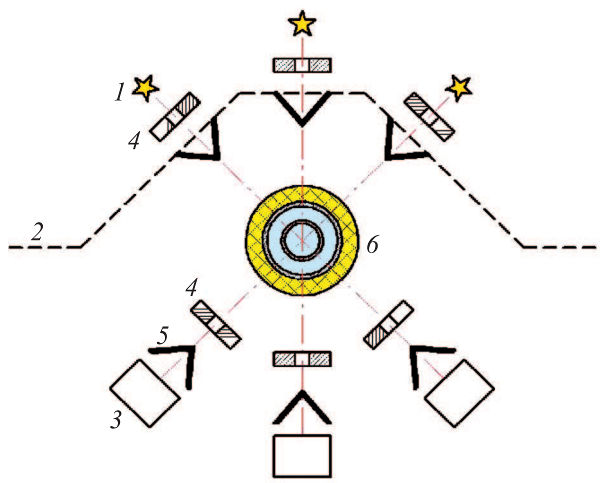

Рис. 2. (Цветной онлайн) Схема эксперимента: *1* – источники рентгеновского излучения [13]; *2* – защитное сооружение; *3* регистраторы; *4* – коллиматоры (Pb); *5* – конус (Al); *6* – экспериментальное устройство (см. рис. 1)

При этом длительность каждого импульса составляла ~ 150–180 нс.

В опыте использовалась индивидуальная оптико-электронная система детектирования *3* (рис. 2), имеющая динамический диапазон регистрации $\sim 10^3$, которая активируется синхронно с импульсами бетатрона, что позволяет получать в каждой проекции три независимых рентгеновских изображения. В качестве преобразователей рентгеновского излучения в видимое в данной системе использовались монокристаллы йодистого натрия и силикат лютеция. Для устранения влияния рассеянного излучения на высокочувствительные детекторы *3* (рис. 2) размер поля регистрации в каждой из трех проекций ограничивается свинцовыми коллиматорами *4* (рис. 2). Для защиты бетатронов *1* (рис. 2) и оптико-электронных регистраторов рентгеновского излучения *3* (рис. 2) применены алюминиевые конусы *5* (рис. 2).

Сжатие газа в данной конструкции осуществляется системой ударных волн, циркулирующих в объеме газа, и под действием стальных оболочек *1* и *2* (рис. 1), сходящихся к центру. Этот процесс получил название квазиизэнтропического, так как после прохождения первой ударной волны дальнейшее сжатие газа происходит практически без его существенного нагрева.

Давление в плазме гелия определялось из газодинамических расчетов с учетом реальных термодинамических и прочностных свойств всех элементов экспериментальных устройств и их уравнений состояния. Расчет характеристик экспериментальных устройств выполнен по одномерной газодинамической программе [15], предназначенной для численного моделирования неустановившихся движений сплошной среды, тестированной по экспериментальным данным, полученным в России и за рубежом. Для гелия уравнение состояния в табличной форме рассчитано по модифицированной модели сжимаемого коволюма [16, 17]. Продукты взрыва ВВ описаны уравнением состояния в форме [18] с коэффициентами, подобранными д.ф.-м.н. А.Б. Медведевым. Расчеты выполнены с фактической начальной плотностью ВВ. Для стальных оболочек использовали уравнение состояния (УРС) железа [19]. Для учета влияния упругопластических свойств стальных оболочек использована дислокационная модель [20], учитывающая затухание упругого предвестника и релаксацию сдвиговых напряжений в волнах нагружения. Дополнительно в газодинамическом расчете учитывалась возможность хрупкого разрушения для оболочек. Для оргстекла использовали УРС в форме Ми–Грюнайзена с параметрами: $\rho_0 = 1.18\,\text{г/см}^3$, $c_0 = 2.83\,\text{км/с}$, $n = 4.25$, $h = 5.1$, который удовлетворительно описывает еще и ударную адиабату для пористых образцов с $\rho_0 = 0.11\,\text{г/см}^3$ [21].

Основным критерием истинности получаемого в расчетах давления можно считать удовлетворительное описание всей $R(t)$ траектории движения оболочек экспериментального устройства. Окончательный подбор параметров расчетной схемы проводился по результатам газодинамического моделирования использованной конструкции на ее начальной стадии движения, выполненной на полусферическом макете в [9]. Учитывались данные тестовых экспериментов по регистрации движения ударной волны по элементам экспериментального устройства. Из расчетов конструкций, кроме $R(t)$ диаграмм, получены также распределения давлений $P(R)$ и температур $T(R)$ в плазме по радиусу полости. Для оценки термодинамического состояния сжатой плазмы гелия авторы использовали значения давления и температуры в плазме в момент ее максимального сжатия, полученные усреднением расчетных значений $P(R)$ и $T(R)$ по массе.

Для трассировки границ сферических оболочек, как и в [1–9], применен функциональный метод, в основе которого лежит использование априорной информации о функции плотности почернения фотоматериала в окрестности протяженных границ. Сущность метода – экстраполяция приграничных функций, лежащих слева и справа от границы, с целью нахождения точки их пересечения, которая и принимается за координату границы. Для нахождения устойчивого решения число итераций при выборе аппроксимирующей функции составляло не менее 50.

Ряд типичных рентгенограмм, зарегистрированных в эксперименте, и полученные данные по сжимаемости плазмы гелия приведены на рис. 3 вместе с результатами выполненного газодинамического расчета. На том же графике нанесены и экспериментальные результаты, полученные в модельном полусферическом эксперименте, использованные для тестирования модельных расчетов.

Из графика на рис. 3 видно, что расчет с использованием УРС гелия ВНИИЭФ при учете упругопластических свойств для металла оболочек по модели [19] хорошо описывает контрольные точки (*pt*.1, *pt*.2) движения ударной волны (УВ) по оболочке из оргстекла, а также измеренные рентгенографическим методом значения границ внешней оболочки экспериментального устройства. Данные расчета воспроизводят также динамику движения внутренней границы оболочек обоих каскадов (Fe1 и Fe2), зарегистрированную методом гетеродин-интерферометра. Как следует из анализа выполненного расчета, в момент максимального сжатия в гелиевой плазме реализуется давление $P_{\text{mean}} = 10062\,\text{ГПа}$ и температура $T = 94900\,\text{K}$ при измеренной плотности сжатой плазмы $\rho = 8.8 \pm 1.3\,\text{г/см}^3$ и величине сжатия $\sigma = \rho/\rho_0 \approx 240$. Критерием истинности давления является хорошее совпадение экспериментальных данных и рассчитанной $R(t)$ диаграммы. Рассчитанное значение средней плотности $\rho_{\text{calc}} = 10.63\,\text{г/см}^3$ согласуется с экспериментально измеренной величиной с неопределенностью в 20.8 %.

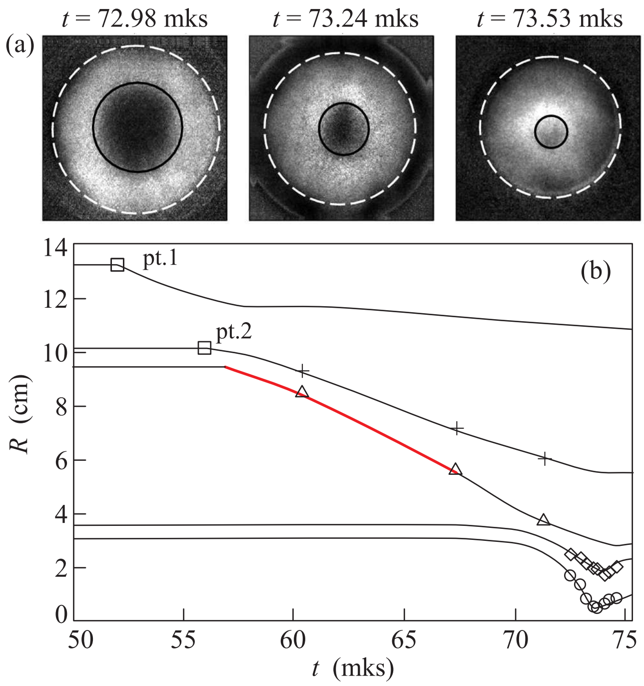

Рис. 3. (Цветной онлайн) Результаты эксперимента по квазиизэнтропическому сжатию гелия. (a) – Типичные рентгенограммы сжатой полости оболочки *2* (рис. 1) с плазмой гелия. (b) – Экспериментальные данные и рассчитанные $R(t)$ диаграммы: квадрат – электроконтактная методика, треугольник и плюс – данные рентгенографирования из модельного эксперимента [9], красная линия – PDV-методика; круг, ромб – данные основного эксперимента; черная линия – расчет по [15]

Результат настоящей работы приведен на рис. 4 вместе с данными из [3–7]. На том же рисунке нанесены изэнтропы, рассчитанные по УРС гелия ВНИИЭФ.

Как видно из рис. 4, изэнтропа *1* при $S/R = 16.3$ удовлетворительно описывает данные по сжимаемости гелия, полученные в цилиндрических [22] и сферических устройствах [3–5] при равном давлении газа в обеих полостях конструкции в области давлений до ~ 10000 ГПа, в том числе и результат настоящей работы, несмотря на разницу в значениях начальной плотности газа в диапазоне $\rho_0 = 0.019{-}0.038$ г/см^3.

Однако эта изэнтропа (*1*, рис. 4) при $S/R = 16.3$ не описывает данные экспериментов при высоких степенях сжатия плазмы гелия в ~ 600 и 900 раз из [6, 7]. Как следует из рис. 4, полученные в [6, 7] данные лежат на изэнтропе *2* при $S/R = 14.9$.

В результате проведенного эксперимента расширена область исследованных состояний квазиизэнтропически сжатой неидеальной плазмы гелия до уникально высокого давления $P \sim 10000$ ГПа. Анализ разработанной авторами методологии изготовления сферических устройств позволяет надеяться на возможность исследований квазиизэнтропической сжимаемости неидеальной плазмы гелия до давлений $P \sim 20000$ ГПа.

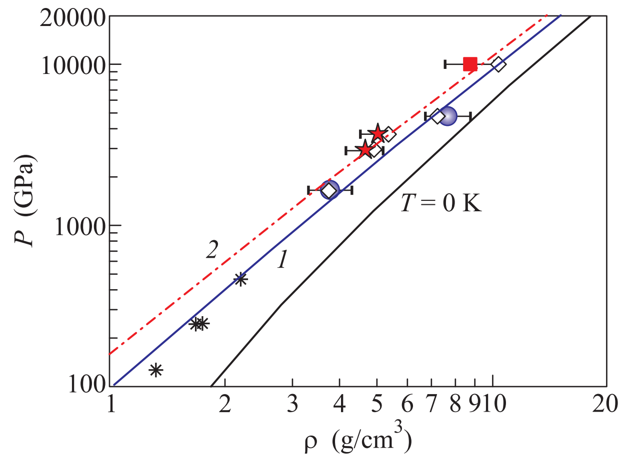

Рис. 4. (Цветной онлайн) Квазиизэнтропическая сжимаемость плазмы гелия. Эксперимент: квадрат – настоящая работа; звезда, круг – из работ [3–7], снежинка – [22]; ромб – расчет. Изэнтропы [7]: *1* – $S/R = 14.9$; *2* – $S/R = 16.3$

В заключение авторы выражают благодарность В.В. Хрусталеву за возможность использовать в расчетах разработанное им УРС гелия, за полезные обсуждения и замечания по существу выполненной работы, а также сотрудникам, принимавшим участие в организации, проведении эксперимента и обработке полученных данных: А.И. Лебедеву, С.Е. Елфимову, Р.В. Борисову, Е.П. Волкову, Р.В. Тилькунову, О.А. Есину, А.В. Романову, Д.П. Турутину, А.С. Пупкову, С.В. Ерунову, Г.С. Яндубаеву, Д.М. Моисееву, В.В. Ковалдову, А.И. Ломайкину.

Настоящая работа выполнена при поддержке Программы Президиума РАН "Теплофизика и механика экстремальных энергетических воздействий и физики сильно-сжатого вещества" и Российского фонда фундаментальных исследований (грант # 16-02-00275).

1. V. E. Fortov, R. I. Il'kaev, V. A. Arinin, V. V. Burtzev, V. A. Golubev, I. L. Iosilevskiy, V. V. Khrustalev, A. L. Mikhailov, M. A. Mochalov, V. Ya. Ternovoi, and M. V. Zhernokletov, Phys. Rev. Lett. **99**, 185001 (2007).
2. М. А. Мочалов, Р. И. Илькаев, В. Е. Фортов, А. Л. Михайлов, Ю. М. Макаров, В. А. Аринин, С. К. Гришечкин, А. О. Бликов, В. А. Огородников,

А. В. Рыжков, В. К. Грязнов, Письма в ЖЭТФ **92**, 336 (2010).
3. М. А. Мочалов, Р. И. Илькаев, В. Е. Фортов, А. Л. Михайлов, Ю. М. Макаров, В. А. Аринин, А. О. Бликов, А. Ю. Баурин, В. А. Комраков, В. А. Огородников, А. В. Рыжков, Е. А. Пронин, А. А. Юхимчук, ЖЭТФ **142**, 696 (2012).
4. М. А. Мочалов, Р. И. Илькаев, В. Е. Фортов и др. (Collaboration), ЖЭТФ **146**, 169 (2014).
5. М. А. Мочалов, Р. И. Илькаев, В. Е. Фортов, А. Л. Михайлов, В. А. Аринин, А. О. Бликов, А. Ю. Баурин, В. А. Комраков, В. А. Огородников, А. В. Рыжков, А. А. Юхимчук, Письма в ЖЭТФ **96**, 172 (2012).
6. М. А. Мочалов, Р. И. Илькаев, В. Е. Фортов, А. Л. Михайлов, В. А. Аринин, А. О. Бликов, В. А. Комраков, А. В. Рыжков, В. А. Огородников, А. А. Юхимчук, Письма в ЖЭТФ **101**, 575 (2015).
7. М. А. Мочалов, Р. И. Илькаев, В. Е. Фортов, А. Л. Михайлов, В. А. Аринин, А. О. Бликов, С. Е. Елфимов, В. А. Комраков, В. А. Огородников, А. В. Рыжков, ЖЭТФ **152**, 1113 (2017).
8. М. А. Мочалов, Р. И. Илькаев, В. Е. Фортов, А. Л. Михайлов, А. О. Бликов, В. А. Огородников, В. К. Грязнов, И. Л. Иосилевский, ЖЭТФ **151**, 592 (2017).
9. М. А. Мочалов, Р. И. Илькаев, В. Е. Фортов, А. Л. Михайлов, В. А. Аринин, А. О. Бликов, В. А. Комраков, И. П. Максимкин, В. А. Огородников, А. В. Рыжков, Письма в ЖЭТФ **107**, 173 (2018).
10. A. Förster, T. Kahlbaum, and W. Ebeling, Laser and Particle Beams **10**, 253 (1992).
11. А. О. Бликов, И. С. Калинин, В. А. Комраков, М. А. Мочалов, В. А. Огородников, А. В. Романов, Патент (RU) 2545289 C1, бюлл. # 9, 27.03.2015.
12. А. О. Бликов, А. Ю. Гусев, В. А. Комраков, А. В. Котин, Д. А. Линяев, М. А. Мочалов, В. А. Огородников, С. Н. Шошин, Патент (RU) 168263 U1, бюлл. # 3, 25.01.2017.
13. В. В. Сычев, А. А. Вассерман, Г. А. Спиридонов, В. А. Цымарный, *Термодинамические свойства гелия. ГСССД*, Изд-во стандартов, М. (1984), 320 с.
14. Yu. P. Kuropatkin, V. D. Mironenko, V. N. Suvorov, D. I. Zenkov, and B. F. Tkachenko, in: *11th IEEE Pulsed Power Conference/Digest of technical papers*, ed. by G. Cooperstein and I. Vitkovitsky, Institute of Electrical and Electronics Engineers, Piscataway, New Jersey, USA (1997), p. 1669.
15. Н. Ф. Гаврилов, Г. Г. Иванова, В. И. Селин, В. Н. Софронов, ВАНТ, сер. Методики и программы численного решения задач математической физики **3**(11), 11 (1982).
16. В. П. Копышев, ПМТФ **12**, 103 (1971).
17. В. П. Копышев, В. В. Хрусталев, ПМТФ **21**, 122 (1980).
18. В. Н. Зубарев, А. А. Евстигнеев, ФГВ **20**, 114 (1984).
19. Б. Л. Глушак, Л. Ф. Гударенко, Ю. М. Стяжкин, В. А. Жеребцов, ВАНТ, сер.: Матем. моделирование физических процессов **1**, 32 (1991).
20. И. Р. Трунин, С. В. Корицкая, В. Арнолд, Препринт 75-2000, Саров (2000), 64 с.
21. Л. Ф. Гударенко, М. В. Жерноклетов, С. И. Киршанов, А. Е. Ковалев, В. Г. Куделькин, Т. С. Лебедева, А. И. Ломайкин, М. А. Мочалов, Г. В. Симаков, А. Н. Шуйкин, И. М. Воскобойников, ФГВ **40**, 104 (2004).
22. М. В. Жерноклетов, В. К. Грязнов, В. А. Аринин, В. Н. Бузин, Н. Б. Давыдов, Р. И. Илькаев, И. Л. Иосилевский, А. Л. Михайлов, М. Г. Новиков, В. В. Хрусталев, В. Е. Фортов, Письма в ЖЭТФ **96**, 479 (2012).