

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЫХОДОВ DD-РЕАКЦИЙ ИЗ ГЕТЕРОСТРУКТУРЫ Pd/PdO:D<sub>x</sub> ПРИ НИЗКИХ ЭНЕРГИЯХ НА УСТАНОВКЕ ГЕЛИС

А. В. Багуля, О. Д. Далькаров, М. А. Негодаев,  
А. С. Русецкий, А. П. Чубенко

*Приводятся результаты измерения выходов DD-реакций из гетероструктуры Pd/PdO:D<sub>x</sub> в диапазоне энергий 10–25 кэВ. Измерялись потоки нейтронов и протонов с помощью нейтронного детектора на основе He-3 счетчиков и пластикового трекового детектора CR-39. Сравнения с расчетами показали наличие значительных эффектов усиления выходов DD-реакций. Потенциал экранирования для данной гетероструктуры при данных условиях эксперимента оценен в диапазоне  $U_e = 630 - 980$  эВ.*

**Ключевые слова:** DD-реакции, потенциал экранирования, потоки протонов и нейтронов.

Измерение сечений ядерных реакций синтеза при низких энергиях представляет значительный интерес как для создания энергетических установок нового поколения, так и для понимания процессов, протекающих внутри звезд (обзор раннего периода исследований в этой области можно найти, например, в [1–4]). Напомним, что прямое измерение сечений при малых энергиях затруднено в связи с проблемами обеспечения устойчивости ускорительных пучков низких энергий. Поэтому сечения ядерных реакций при низких энергиях ( $\leq 100$  кэВ) обычно находят с помощью экстраполяции из области высоких энергий, где эти сечения могут быть измерены в экспериментах на ускорителях.

Недавние эксперименты на ускорителях при энергиях  $< 10$  кэВ показали, что в случае использования твердотельных мишеней с имплантированным в них дейтерием наблюдаются значительные эффекты увеличения вероятности протекания DD-реакции по сравнению с экстраполяцией. Степень усиления выхода DD-реакции характеризует

т.н. потенциал экранирования, который определяется как добавочная энергия, необходимая ядру дейтерия для преодоления кулоновского барьера.

В работах Райола и др. [5, 6] выходы DD-реакции и потенциалы экранирования изучались систематически для почти 70-ти элементов Периодической системы, включая металлы и неметаллы. Было обнаружено, что большинство изученных металлов имеют “большой” потенциал экранирования,  $U_e \geq 100$  эВ, за исключением металлов 4 группы (Ti, Zr, Hf) и 11 группы (Cu, Ag, Au). В то же время следует отметить, что ускоритель, использованный в [5, 6], позволял достигать токов дейтронов лишь от 1 до 54 мкА, что минимизировало эффекты усиления, зависящие от плотности тока на мишени.

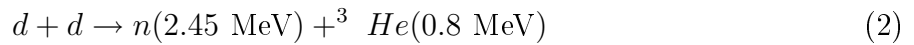
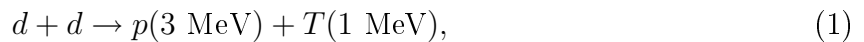
Касаги и др. [7, 8], используя низкоэнергетический ускоритель с большими токами (ток ионов – 60–400 мкА), измеряли выходы реакции  $D(d,p)T$  в некоторых металлах и оксидах металлов при энергиях  $E_{\text{lab}} \geq 2.5$  кэВ. Было обнаружено, что величина потенциала экранирования при данной интенсивности пучка сильно зависит от подвижности дейтерия в металлах. В случае металлов с малой подвижностью дейтерия и высокой энергией активации диффузии дейтронов (Ti, Au) потенциалы экранирования были низкими,  $65 \pm 15$  эВ и  $70 \pm 10$  эВ, соответственно. Эти потенциалы экранирования  $U_e$  лишь в 2 раза выше величины для газовой ( $D_2$ ) мишени. Напротив, для мишеней Pd и PdO с высокой подвижностью дейтерия  $U_e = 310$  и 600 эВ, соответственно [8]. Таким образом, экспериментальные данные показывают, что протекание процессов синтеза ядер дейтерия в твердотельных и газовых мишенях сильно различаются. При этом наибольшее усиление DD-реакции продемонстрировали материалы с большой степенью подвижности водорода (Pd и PdO).

Установка ГЕЛИС [9], созданная в Физическом институте им. П. Н. Лебедева РАН, позволяет получать непрерывные пучки ионов с током до 50 мА и энергиями до 50 кэВ и предназначена для проведения широкого спектра экспериментов, таких как изучение столкновений легких ядер с энергией в десятки кэВ, изучение элементарных и коллективных процессов в ионно-пучковой плазме, изучение взаимодействий ионного пучка с различными материалами, модификация их поверхности и получение методом ионно-лучевого распыления тонкопленочных покрытий.

Основной частью установки ГЕЛИС является ускоритель ионов, который включает в себя: 1) ионный источник с оборудованием, обеспечивающим его питание; 2) систему фокусировки ионного пучка; 3) вакуумную систему; 4) диагностическую аппаратуру для измерения тока и энергии ионного пучка.

Образцы Pd/PdO:D<sub>x</sub> размером 2.5 × 1 см<sup>2</sup> готовились путем термического окисления Pd фольги (99.95% чистоты, толщиной 50 мкм). В результате на поверхности фольги образуется окисная плёнка PdO толщиной ~50 нм. Затем образцы насыщались дейтерием с помощью электролиза в 0.3M растворе LiOD в D<sub>2</sub>O с Pt анодом при плотности тока  $j = 20$  мА/см<sup>2</sup> и температуре ~290 К в ячейке с разделенными катодным и анодным пространствами. После 20 мин насыщения дейтерием до степени  $x = D/Pd \sim 0.73$  образцы промывались в тяжёлой воде и охлаждались жидким азотом до температуры  $T = 77$  К (охлаждение образца до температуры жидкого азота необходимо для замедления выхода дейтерия, чтобы исследовать влияние ионизирующего излучения на процесс десорбции). Затем мишень устанавливалась в держатель, напротив закрепленных детекторов CR-39, и помещалась в экспериментальную вакуумную камеру установки ГЕЛИС для последующих исследований. Затрачиваемое на монтаж мишени время не превышало 30 минут.

Для детектирования продуктов DD-реакций



использовались многоканальный детектор нейтронов на основе счетчиков с наполнением He-3 и трековый детектор CR-39.

Схемы расположения детекторов и мишени на установке ГЕЛИС показаны на рис. 1(а) и рис. 1(б).

Для калибровки He-3 детектора использовался источник нейтронов Cf-252 с активностью  $4.8 \cdot 10^4$  н/с в телесный угол  $4\pi$ , который помещался на место мишени.

При расположении He-3 детектора в положении 1 ( $R1 = 120$  см) эффективность регистрации нейтронов оказалась равной  $\eta_{n1} = 0.1\%$ . При расположении He-3 детектора в положении 2 ( $R2 = 30$  см) эффективность регистрации нейтронов оказалась равной  $\eta_{n2} = 0.4\%$ .

Три детектора CR-39 (1, 2, 3) (см. рис. 1(б)) устанавливаются с трех сторон исследуемого образца (4) в держателе с манипулятором, который позволяет перемещать образец поперек пучка ионов (6). Детекторы 1 и 2, расположенные над образцом, имеют покрытия 11 (или 22) и 55 (или 66) мкм Al, соответственно. Они предназначены для регистрации заряженных частиц и нейтронов, вылетевших с облученной поверхности образца против направления пучка. Детектор 3, расположенный под образцом,

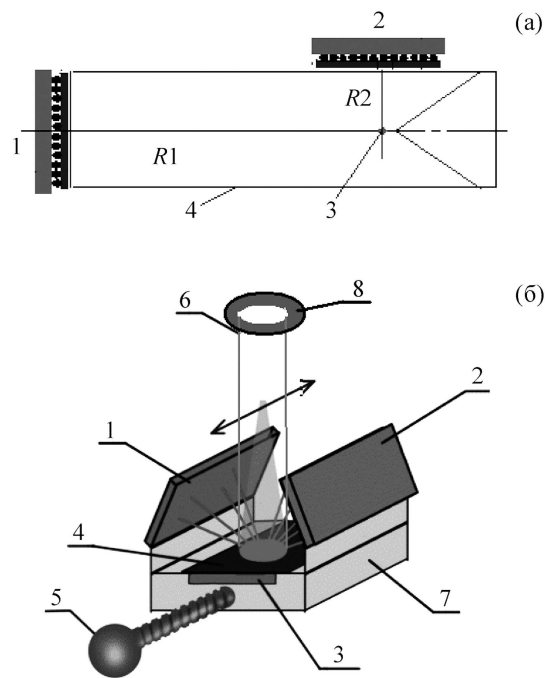


Рис. 1: (а) Схема расположения  $\text{He-3}$  детектора на установке ГЕЛИС. 1 и 2 – два положения  $\text{He-3}$  детектора ( $R1 = 120$  см,  $R2 = 30$  см), 3 – место расположения мишени, 4 – контуры установки ГЕЛИС; (б) Схема расположения мишени и трековых детекторов в пучке ионов в установке ГЕЛИС. 1, 2, 3 – трековые детекторы CR-39 с различными покрытиями; 4 – мишень; 5 – манипулятор; 6 – пучок ионов; 7 – стальная подложка; 8 – диафрагма.

имеет покрытие 11 (или 33) мкм Al. Он предназначен для регистрации нейтронов, вылетевших с облученной поверхности образца в направлении пучка. Покрытия разной толщины позволяют не только защитить поверхность детектора от прямого попадания распыленных частиц образца, но и получить смещение энергетического спектра заряженных частиц на известную величину потерь энергии в соответствующем фильтре.

Калибровка детектора CR-39 была проведена с помощью протонного пучка ускорителя Ван-де-Граафа ( $E_p = 0.75 - 3.0$  МэВ), стандартных  $\alpha$ -источников ( $E_\alpha = 2 - 7.7$  МэВ) и пучка циклотрона ( $E_\alpha = 8 - 30$  МэВ) в НИИЯФ МГУ. После облучения детекторы травились в растворе 6М NaOH в  $\text{H}_2\text{O}$  при  $70^\circ\text{C}$  в течение 7 ч. Измерение диаметров треков частиц проведено с помощью измерительного комплекса ПАВИКОМ. На рис. 2 представлены результаты калибровки, т.е. зависимости диаметров треков протонов и  $\alpha$ -частиц от их энергии.

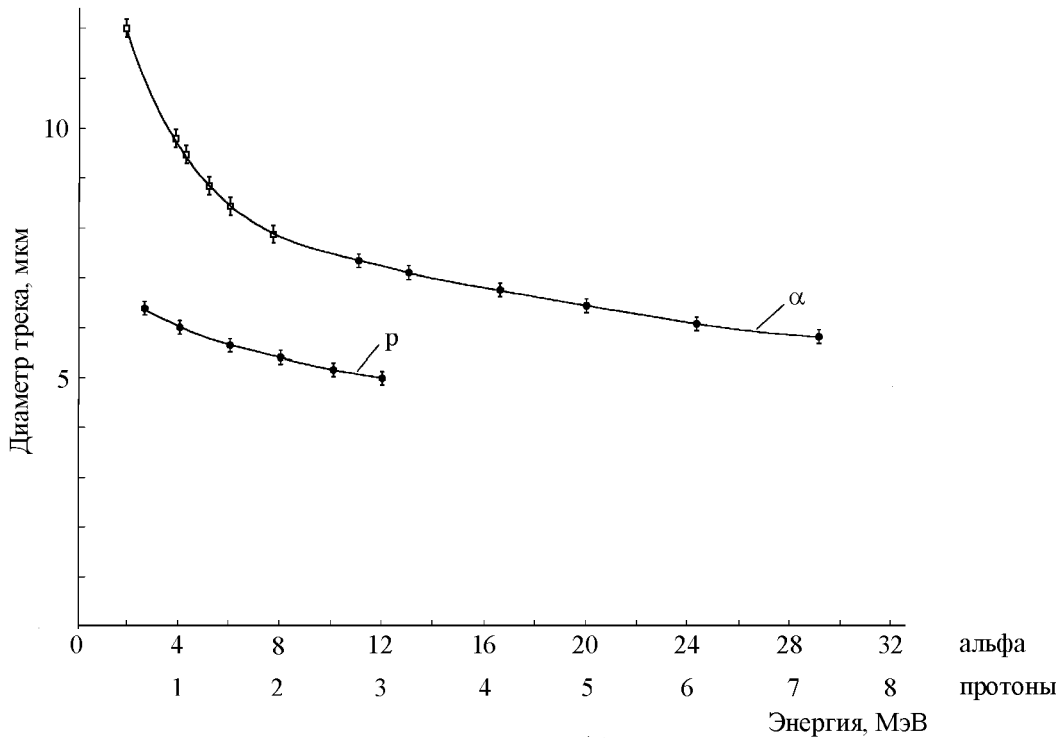


Рис. 2: Зависимости диаметров треков  $\alpha$ -частиц и протонов от их энергии. Трековый детектор CR-39 травился 7 ч в растворе NaOH в  $H_2O$  при  $70^\circ C$ .

Измерения с источником Pu-239, помещенным на место образца, показали, что детекторы 1 и 2, расположенные над образцом, имеют эффективность детектирования заряженных частиц  $\eta_p = 0.026$ .

Облучение трекового детектора CR-39 нейтронами проводилось с помощью источника Cf-252 с активностью 120 п/с в телесный угол  $4\pi$  ср. Полный флюенс нейтронов за время облучения составил  $7 \times 10^8$  п/см<sup>2</sup>. Быстрые нейтроны от источника испытывают упругое рассеяние на атомах водорода в радиаторе и в самом детекторе, при этом образуются протоны отдачи, которые регистрируются детектором.

Средняя эффективность регистрации быстрых нейтронов трековым детектором оказалась равной  $\eta_n = 10^{-4}$ .

Для вычисления выхода протонов из толстой мишени (катода), бомбардируемой дейтронами с энергией  $E_d$ , мы использовали формулу [10]:

$$Y_b(E_d) = \int_0^{E_d} N_D(x) \sigma_{\text{lab}}(E) (dE/dx)^{-1} dE, \quad (3)$$

где  $N_D(x)$ ,  $\sigma_{\text{lab}}(E)$  и  $dE/dx$  – плотность дейтронов в катоде, сечение DD-реакции и тормозная способность дейтронов в материале мишени, соответственно. Параметризация Боша–Халле использовалась для экстраполяции сечения при низких энергиях [11]. Тормозная способность дейтронов предполагалась пропорциональной скорости дейтронов при низкой энергии, что подтверждается данными для различных мишеней, по меньшей мере, до  $E_d = 1.0$  кэВ [12].

С учетом того, что в процессе облучения и повышения температуры мишени начальная концентрация дейтерия в ней может измениться, для расчетов используется эффективная концентрация дейтерия. Эффективная концентрация дейтерия определяется как:  $N_D(\text{eff}) = k(W, T)N_D(x)$ , где  $T$  и  $W$  – температура и мощность на поверхности мишени. При этом коэффициент  $k$  может быть записан как:

$$k(W, T) = \exp \left[ -\frac{\epsilon_d \Delta T}{k_B T_m T_0} * (W_m/W_x) \right], \quad (4)$$

где  $\epsilon_d$  – энергия активации выхода дейтрона с поверхности мишени;  $T_m$  – максимальная температура на поверхности мишени,  $T_0 = 290$  К – начальная температура мишени,  $\Delta T = T_m - T_0$ ,  $W_m$  – максимальная мощность при  $E_d = 25$  кэВ,  $I_m = 0.2$  мА;  $W_x$  – значение мощности при других (меньших) значениях тока и напряжения. Величина  $\epsilon_d$  равняется 0.086 эВ для Pd.

Зависимость потоков протонов и нейтронов, испущенных по пучку и против пучка (см. поз. 1,2 рис. 1(б)), от энергии показана на рис. 3. Наблюдается анизотропия в вылете продуктов DD-реакции, испущенных по пучку и против пучка. Также заметна разница в потоках нейтронов и протонов, характеризующая соотношение вероятностей протекания DD-реакции по каналам (1) и (2). Это указывает на то, что, возможно, DD-реакция идет не через образование составного ядра He-4\*, а реализуется механизм неполного проникновения дейтрона в ядро.

Зависимость выхода DD-реакции из мишени Pd/PdO:D<sub>x</sub> от энергии дейтронов приведена на рис. 4. Там же приведены значения выходов DD-реакции, рассчитанные для данных условий эксперимента по (3).

Коэффициент усиления определяется как

$$f(E) = Y_{\text{exp}}(E)/Y_b(E) = \exp[\pi\eta(E)U_e/E], \quad (5)$$

где  $Y_{\text{exp}}(E)$  – экспериментальный выход DD-протонов,  $Y_b(E)$  – выход при той же энергии, определенный в соответствии с экстраполяцией Боша–Халле [11];  $2\pi\eta = 31.29Z^2(\mu/E)^{1/2}$  – параметр Зоммерфельда (здесь  $Z$  – заряд дейтрона,  $\mu$  и  $E$  – приведенная масса и энергия дейтрона, соответственно).

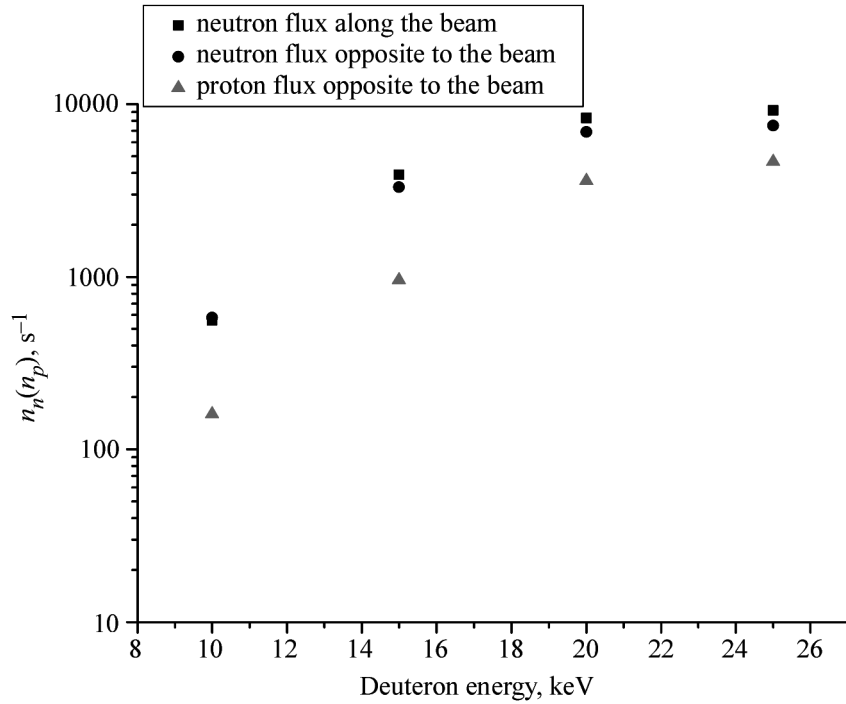


Рис. 3: Зависимость потоков протонов и нейтронов, испущенных из мишени  $Pd/PdO:D_x$  по пучку и против пучка, от энергии. ■ – поток нейтронов по пучку, ● – поток нейтронов против пучка, ▲ – поток протонов против пучка. Измерения проведены трековым детектором CR-39.

Потенциал экранирования  $U_e$  оценивался по полуэмпирической формуле [13]:

$$U_e = (T/T_0)^{-1/2}[a \ln(y) + b], \quad (6)$$

где  $a = 145.3$  и  $b = 71.2$  – численные константы и  $y = ky_0(J_d/J_0)$  (здесь  $k = \exp(\epsilon_d \Delta T / k_B T T_0)$ ,  $\epsilon_d = 0.086$  эВ – энергия активации дейтрона в палладии,  $y_0 = Me/D = 6.7$  – отношение концентраций атомов металла и дейтерия в мишени при  $T_0 = 290$  К и  $J_0 = 0.03$  mA/cm<sup>2</sup>),  $J_d$  – плотность тока дейтронов.

В случае DD-реакции потенциал экранирования можно записать как:

$$U_e = \ln f(E)^{3/2} / 15.7, \quad (7)$$

где  $E$  (кэВ) – энергия дейтрона в с.д.и. Подставив в (7) данные по коэффициентам усиления DD-реакции, можно оценить потенциалы экранирования, полученные в конкретном эксперименте.

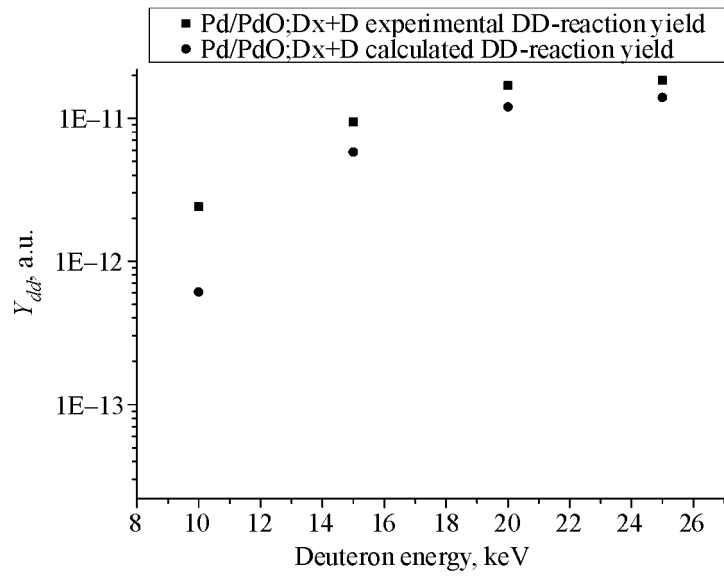


Рис. 4: Зависимость выходов  $DD$ -реакции из мишени  $Pd/PdO:D_x$  от энергии пучка  $D^+$ . ■ – измеренный выход  $DD$ -реакции по пучку, ● – выход  $DD$ -реакции, рассчитанный для данной энергии по (3).



Рис. 5: Фотография мишени  $Pd/PdO:D_x$  после облучения пучком  $D^+$  (светлое пятно в центре соответствует области с повышенной плотностью тока).



Коэффициенты усиления и потенциалы экранирования в мишени Pd/PdO:D<sub>x</sub> представлены в табл. 1.

Т а б л и ц а 1

Энергия пучка, $E_d$ , кэВ	10	15	20	25
Плотность тока пучка, $J_d$ , мА/см <sup>2</sup>	0.23	0.2	0.21	0.21
Коэффициент усиления, $f$	4	1.6	1.4	1.3
Потенциал экранирования $U_e$ , эВ	980	630	670	760
Потенциал экранирования (расчет), $U_e$ , эВ	114–516	114–516	114–516	114–516

Расчет потенциалов экранирования был проведен для двух “крайних” условий: 1) при  $T = 1887$  К – температура плавления палладия в области пучка и 2)  $T = 350$  К – температура, зарегистрированная термопарным термометром на краю мишени.

Расчет при плотности тока пучка дейтронов  $0.25$  мА/см<sup>2</sup> дал величину потенциала экранирования в диапазоне  $U_e = 114 - 516$  эВ, что намного меньше экспериментальных значений. Для их достижения, необходимо подставить в формулу (6) величину плотности тока дейтронов  $J_d = 1 - 10$  мА/см<sup>2</sup> и тогда значение потенциала экранирования находится в диапазоне  $U_e = 700 - 990$  эВ. Увеличение плотности тока на мишень Pd/PdO:D<sub>x</sub> в процессе облучения мишени наблюдается экспериментально и может происходить из-за дополнительной фокусировки пучка в результате десорбции дейтерия, стимулированной облучением. На фотографии мишени после облучения пучком  $D^+$  (рис. 5) видно, что на области попадания пучка, ограниченного диафрагмой диаметром 6 мм, имеется более яркое пятно диаметром 2 мм с повышенной плотностью тока, обусловленное самофокусировкой пучка вблизи поверхности мишени.

Таким образом, в данной работе при исследовании зависимости выходов продуктов DD-реакции из гетероструктуры Pd/PdO:D<sub>x</sub> от энергии дейтронов в диапазоне 10–25 кэВ получены значительные эффекты усиления по сравнению с теоретической экстраполяцией. Потенциал экранирования для данной гетероструктуры при данных условиях эксперимента оценен в диапазоне  $U_e = 630 - 980$  эВ.

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки (государственный контракт N 16.518.11.7104 по мероприятию 1.8 ФЦП “Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2007–2013 годы”).

## Л И Т Е Р А Т У Р А

- [1] В. А. Царев, УФН **160**(11), 1 (1990).
- [2] В. А. Царев, УФН **162**(10), 6 (1992).
- [3] V. A. Tsarev and D. H. Worledge, Fusion Technology **22**, 138 (1991).
- [4] V. A. Chechin, V. A. Tsarev, M. Rabinovitz, and Y. E. Kim, Int. Journal of Theor. Phys. **33**(3), 617 (1994).
- [5] F. Raiola, P. Migliardi, G. Gyurky, et al., Eur. Phys. J. A **13**, 377 (2002).
- [6] F. Raiola, P. Migliardi, L. Gang, et al., Phys. Lett. **B547**, 193 (2002).
- [7] H. Yuki, T. Sato, J. Kasagi, et al., J. Phys.G: Nucl. Part. Phys. **23**, 1459 (1989).
- [8] H. Yuki, J. Kasagi, A. G. Lipson, et al., JETP Lett. **68**, 785 (1998).
- [9] М. А. Негодаев, А. В. Багуля, Препринт ФИАН № 11 (М., ФИАН, 1996).
- [10] A. G. Lipson, A. S. Roussetski, A. B. Karabut, and G. H. Miley, ЖЭТФ **127**(6), 1334 (2005).
- [11] H. S. Bosch and G. M. Halle, Nucl. Fusion. **32**, 611 (1994).
- [12] H. H. Anderson and J. F. Ziegler, *Hydrogen Stopping Powers and Ranges in All Elements* (Pergamon, New York, 1977.)
- [13] А. Г. Липсон, А. С. Русецкий, Б. Ф. Ляхов и др. Химия высоких энергий **42**(4), 361 (2008).

Поступила в редакцию 5 июля 2012 г.