

## ИССЛЕДОВАНИЕ РЕАКЦИИ $D(p, \gamma)^3\text{He}$ В ДЕЙТЕРИДЕ ЦИРКОНИЯ В ИНТЕРВАЛЕ ЭНЕРГИЙ ПРОТОНОВ 9–35 кэВ

*В. М. Быстрицкий*<sup>a,1</sup>, *С. Гази*<sup>b</sup>, *Й. Гуран*<sup>b</sup>,  
*Г. Н. Дудкин*<sup>c</sup>, *А. Р. Крылов*<sup>a</sup>, *А. С. Лысаков*<sup>c</sup>,  
*Б. А. Нечаев*<sup>c</sup>, *В. Н. Падалко*<sup>c</sup>, *А. Б. Садовский*<sup>a</sup>,  
*М. Филипович*<sup>2</sup>, *А. В. Филиппов*<sup>a</sup>

<sup>a</sup> Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

<sup>b</sup> Электротехнический институт Словацкой академии наук, Братислава

<sup>c</sup> Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Томск, Россия

<sup>2</sup> Факультет энергии и топлива Университета науки и технологий, Краков, Польша

Работа посвящена измерению зависимостей эффективного сечения и астрофизического  $S$ -фактора для  $pd$ -реакции, протекающей в дейтериде циркония, от энергии столкновения протонов с дейтронами в интервале 6,0–23,3 кэВ. Эксперимент выполнялся на сильноточном плазменном ускорителе Холла НИ ТПУ (Томск). Регистрация гамма-квантов, образующихся в  $pd$ -реакции с энергией 5,5 МэВ, осуществлялась с помощью восьми сцинтилляционных спектрометров на основе кристаллов NaI(Tl) ( $400 \times 100 \times 100$  мм), расположенных вокруг мишени. Результат настоящей работы как совпадает с результатом нашей предыдущей работы, полученным в интервале энергий столкновения протонов с дейтронами 7,3–12,7 кэВ, так и находится в хорошем согласии с результатом, полученным коллаборацией LUNA с использованием газообразной дейтериевой мишени.

The work is dedicated to measuring of the effective cross section and astrophysical  $S$  factor dependences for  $pd$  reaction in deuteride zirconium in the protons with deuterons collision energy range of 6.0–23.3 keV. The experiment was performed using a high-current plasma Hall accelerator of the NR TPU (Tomsk). Registration of gamma rays produced in the  $pd$  reaction with the energy of 5.5 MeV was carried out using 8 scintillation spectrometers based on crystals of NaI(Tl) ( $400 \times 100 \times 100$  mm) located around the deuteride zirconium target. The result of this work is the same as a result of our previous work, obtained in the range of collision energies of protons with deuterons 7.3–12.7 keV, and is in good agreement with the result obtained by the LUNA collaboration with gaseous deuterium target.

PACS: 25.40.Ep; 25.55.Ci

---

<sup>1</sup>E-mail: bystvm@jinr.ru

## ВВЕДЕНИЕ

Интерес к изучению ядерной реакции



в области ультранизких энергий столкновения протонов с дейтронами обусловлен возможностью:

- 1) объяснения различия между двумя наборами значений длин рассеяния, полученных для трехтелных систем в экспериментах по  $nd$ - и  $pd$ -рассеянию [1–4];
- 2) сравнения результатов экстраполяции значений сечения  $pd$ -рассеяния, измеренных в диапазоне энергий  $\sim$  МэВ, в низкоэнергетическую область с соответствующими значениями зеркальной реакции  $d(n, \gamma)t$  [5–7];
- 3) проверки и определения величины изменения астрофизического  $S$ -фактора для  $pd$ -реакции за счет ядерного электронного экранирования взаимодействующих частиц [8];
- 4) устранения некоторых актуальных проблем, существующих в области астрофизики [9–13].

Кроме этого, однозначная информация о вкладе в  $pd$ -взаимодействие обменных мезонных токов [5–7] может быть получена путем измерения выхода гамма-квантов с энергией 5,5 МэВ из реакции (1) в зависимости от энергии столкновения протонов с дейтронами. Это утверждение следует из того, что характеристики  $p(d, \gamma){}^3\text{He}$ -реакции в области ультранизких энергий весьма чувствительны к вкладу в  $pd$ -взаимодействие обменных мезонных токов.

До настоящего времени выполнено пять экспериментов по измерению зависимости астрофизического  $S$ -фактора для  $pd$ -реакции от энергии столкновения протонов с дейтронами с использованием мишеней из: газообразного дейтерия (водорода) [14]; замороженной тяжелой воды  $\text{D}_2\text{O}$  [15, 16]; дейтеридов циркония [18] и титана [19] (см. табл. 1).

Выполнение экспериментов с мишенями из дейтеридов циркония и титана [17, 18] было продиктовано необходимостью получения ответа на вопрос, связанный с определением фактора усиления  $pd$ -реакции, протекающей в указанных дейтеридах металлов, за счет возможной электронной экранировки взаимодействующих протонов с дейтронами.

Хотя ожидаемое увеличение значения астрофизического  $S$ -фактора для  $pd$ -реакции, согласно оценкам в адиабатическом приближении [8], мало (менее 6% при энергии столкновения протонов с дейтронами 2,5 кэВ), тем не менее требовалась экспериментальная проверка выводов данной работы.

Дополнительным толчком, стимулирующим интерес к изучению  $pd$ -реакции в дейтеридах металлов, являлось экспериментальное обнаружение заметного вклада в значение астрофизического  $S$ -фактора для  $dd$ -реакции, протекающей в дейтеридах ряда металлов, в области ультранизких энергий за счет эффекта электронной экранировки взаимодействующих дейтронов [21–28].

В связи с этим нами впервые с использованием сильноточного импульсного плазменного ускорителя Холла НИ ТПУ (Томск) были выполнены эксперименты по изучению  $pd$ -реакции, протекающей в дейтеридах циркония и титана в интервалах энергий столкновения протонов с дейтронами 7,3–12,7 кэВ и 6,0–12,7 кэВ соответственно [18, 19].

Основные результаты, полученные при проведении данных экспериментов, следующие.

Таблица 1. Экспериментальные и расчетные значения астрофизических  $S$ -факторов, а также значения параметров линейной аппроксимации величины  $S_{pd}(E)$ :  $S_0, S'_0, S_{pd}(E) = S_0 + S'_0 \cdot E$ ,  $E$  — энергия столкновения протонов с дейтронами в с.ц.м.,  $\Delta E_p$  — интервал энергий столкновения протонов с дейтронами в с.ц.м.

Работа	Мишень	$\Delta E_p$ , кэВ	$S_0$ , эВ · б	$S'_0$ , эВ · б · кэВ <sup>-1</sup>	$S_{pd}(0)$ , эВ · б	$U_e$
[20]	Расчет				$0,185 \pm 0,005$	
[15]	D <sub>2</sub> O	16–32			$0,25 \pm 0,04$	
[16]	D <sub>2</sub> O	6,7–53,3	$0,166 \pm 0,005$	$0,0071 \pm 0,0004$	$0,166 \pm 0,014$	
[14]	Газ D <sub>2</sub> (H <sub>2</sub> )	2,7–32,3	$0,216 \pm 0,006$	$0,0059 \pm 0,0004$	$0,216 \pm 0,010$	
[17]	D <sub>2</sub> O	2,7–21,6	$S_{pd}(E = 8,1 \text{ кэВ}) = 0,237 \pm 0,071$ $S_{pd}(E = 9,3 \text{ кэВ}) = 0,277 \pm 0,064$ $S_{pd}(E = 9,9 \text{ кэВ}) = 0,298 \pm 0,065$			
[18]	ZrD <sub>2</sub>	7,3–12,7	$0,223 \pm 0,042$	$0,0062 \pm 0,0042$	$0,223 \pm 0,049$	
[19]	TiD <sub>2</sub>	6–12,7	$S_{pd}(E = 6 \text{ кэВ}) = 0,30 \pm 0,04$ $S_{pd}(E = 7,3 \text{ кэВ}) = 0,29 \pm 0,03$ $S_{pd}(E = 8,7 \text{ кэВ}) = 0,29 \pm 0,03$ $S_{pd}(E = 10 \text{ кэВ}) = 0,29 \pm 0,02$ $S_{pd}(E = 11,3 \text{ кэВ}) = 0,29 \pm 0,02$ $S_{pd}(E = 12,7 \text{ кэВ}) = 0,30 \pm 0,02$			$242 \pm 64$

1. Измерена зависимость астрофизического  $S$ -фактора и эффективного сечения  $pd$ -реакции, протекающей в дейтериде циркония, от энергии столкновения протонов с дейтронами в интервале 7,3–12,7 кэВ [18]. Полученные нами значения  $S$ -фактора находятся в хорошем согласии с работой [14], выполненной с использованием газообразного дейтерия при малых давлениях. Это свидетельствует о том, что эффект усиления  $pd$ -реакции за счет эффекта электронного экранирования, если и существует, то не проявляется на наблюдаемом уровне в дейтериде циркония. Из этого следует, что влияние данного эффекта на интенсивность протекания  $pd$ -реакции в дейтериде циркония существенно меньше, чем для  $dd$ -реакции. Найденные нами значения астрофизического  $S_{pd}$  превышают результаты работы [16], полученные с использованием мишени из тяжелой воды D<sub>2</sub>O. Причина расхождения остается пока не понятной.

2. Наличие спадающей зависимости  $S$ -фактора с уменьшением энергии столкновения протонов с дейтронами в эксперименте с мишенью из дейтерида циркония в интервале 7,3–12,7 кэВ подтверждает результаты работ [14] и [16]. Статистические ошибки найденных значений величины  $S_{pd}(E)$  и ограниченный интервал изменения данной величины по энергии столкновения протонов с дейтронами, указанный выше, не позволили с требуемой точностью определить параметры  $S_0$  и  $S'_0$  линейной функциональной зависимости  $S_{pd}(E) = S_0 + S'_0 \cdot E$ .

3. Из полученных результатов исследования  $pd$ -реакции, протекающей в дейтериде циркония [18], следовало, что для определения  $S_0$  и  $S'_0$  с лучшей точностью необходимо проведение исследований данной реакции в более широком интервале энергий столкновения протонов с дейтронами и при более высоких интенсивностях протонных пучков.

4. Впервые на достоверном уровне экспериментально обнаружено явление электронного экранирования для  $pd$ -реакции в дейтериде титана [19] в интервале энергий столк-

новения протонов с дейтронами (6,0–12,7 кэВ). Измеренное значение потенциала электронного экранирования для  $pd$ -реакции оказалось равным  $(242 \pm 64)$  эВ. Получен совсем неожиданный результат, так как, согласно теоретическим оценкам, проявление эффекта электронного экранирования в указанной области энергий столкновения протонов с дейтронами на экспериментально наблюдаемом уровне практически исключено. Природа столь значимого по величине эффекта электронного экранирования для  $pd$ -реакции, протекающей в дейтериде титана, остается пока не понятной. Непонятно и то, что потенциал электронного экранирования для  $pd$ -реакции более чем в два раза превышает аналогичную величину для  $dd$ -реакции, протекающей в той же области астрофизических энергий с использованием мишени из одного и того же материала. Измерена также зависимость фактора усиления  $pd$ -реакции от энергии столкновения протонов с дейтронами. Фактор усиления при энергии столкновения 6 кэВ составил 23 %.

Для пояснения природы экспериментально обнаруженного различия между зависимостями астрофизического  $S$ -фактора для  $pd$ -реакции от энергии столкновения протонов с дейтронами, измеренными в дейтериде титана [19] и циркония [18], а также между результатами [19] и полученными с мишенями из тяжелой воды  $D_2O$  [15–17] нами было принято решение о необходимости продолжения исследований данной реакции с мишенями из дейтеридов циркония и титана в более широком интервале энергий столкновения протонов с дейтронами с использованием плазменного ускорителя Холла.

В связи с этим целью настоящей работы на первом этапе продолжения исследований  $pd$ -реакции являлось повторение опыта с мишенью из дейтерида циркония с существенным расширением исследуемого диапазона энергий столкновения протонов с дейтронами от 6,0 до 23,3 кэВ.

## 1. МЕТОД ИЗМЕРЕНИЯ

Экспериментальное определение значений астрофизического  $S$ -фактора и эффективного сечения  $pd$ -реакции в области астрофизических энергий основано на измерении выхода гамма-квантов с энергией 5,5 МэВ из реакции (1) и на использовании параметризации зависимости сечения данной реакции от энергии столкновения протонов с дейтронами [17]:

$$N_{\gamma}^{\text{tot}} = N_p \varepsilon_{\gamma} \int_0^{\infty} f(E) dE \int_0^{\infty} \sigma_{pd}(E') n(x) \left( -\frac{dE'}{dx} \right)^{-1} dE', \quad (2)$$

$$\sigma(E) = \frac{S_{pd}(E)}{E} \exp\left(-\frac{\beta}{\sqrt{E}}\right). \quad (3)$$

В случае  $pd$ -реакции  $\beta = 31,29\sqrt{\mu}$ , где  $\beta/\sqrt{E}$  — параметр Зоммерфельда,  $\mu$  — приведенная масса взаимодействующих частиц во входном канала реакции в единицах а. е. м.,  $E$  — энергия столкновения протонов с дейтронами в системе центра масс;  $S_{pd}(E)$  — астрофизический  $S$ -фактор для  $pd$ -реакции;  $N_{\gamma}^{\text{tot}}$  — полное число зарегистрированных гамма-квантов;  $\sigma_{pd}(E)$  — сечение  $pd$ -реакции;  $dE/dx$  — удельные потери энергии протонов в мишени;  $n(x)$  — плотность дейтронов в мишени на глубине  $x$ ;  $f(E)$  — функция

распределения энергии протонов, падающих на мишень;  $\varepsilon_\gamma$  — эффективность регистрации гамма-квантов из  $pd$ -реакции;  $N_p$  — число протонов, попавших в мишень.

Данная параметризация сечения  $pd$ -реакции (3) предполагает взаимодействие «голых» протонов с дейтронами.

С учетом энергетического разброса дейтронов, падающих на дейтериевую мишень, а также кулоновских потерь энергии протонов в результате взаимодействия их с атомами (молекулами мишени) экспериментальные значения  $S$ -фактора для  $pd$ -реакции определяются как [18, 19, 21–23]:

$$\overline{S_{pd}(E)} = \int_0^\infty S_{pd}(E)P(E)dE = S(E_{\text{col}}) = \frac{N_\gamma^{\text{exp}}}{N_p \varepsilon_\gamma \int_0^\infty f(E) dE \int_0^\infty \frac{e^{-2\pi\eta} n(x')}{E'(E, x')} dx'}, \quad (4)$$

где  $2\pi\eta = \beta/\sqrt{E}$ ,

$$P(E) = \frac{e^{-2\pi\eta} D(E) \int_E^\infty n(x(E, E')) f(E') dE'}{\int_0^\infty e^{-2\pi\eta} D(E) dE \int_E^\infty n(x(E, E')) f(E') dE'}, \quad (5)$$

$$D(E) = -\frac{1}{E} \frac{dx}{dE}, \quad (6)$$

$$E_{\text{col}} = \int_0^\infty EP(E) dE; \quad (7)$$

$$\overline{S_{pd}(E)} = S_{pd}(E_{\text{col}}), \quad (8)$$

где  $N_\gamma^{\text{exp}}$  — число зарегистрированных гамма-квантов из  $pd$ -реакции;  $n(x')$  — плотность дейтронов мишени на глубине  $x'$ ;  $E'(E_{\text{cm}}, x')$  — энергия столкновения протона с дейтроном в мишени на глубине  $x'$ ;  $P(E)$  — функция распределения вероятности столкновения протонов с дейтронами с последующей регистрацией выхода гамма-квантов из  $pd$ -реакции;  $E_{\text{col}}$  — энергия столкновения протонов с дейтронами, усредненная по функции распределения  $P(E)$ .

Для определения эффективного сечения  $pd$ -реакции выражение для выхода гамма-квантов из данной реакции  $N_\gamma$  можно записать в простом виде [29]:

$$N_\gamma^{\text{exp}} = N_p n_t \varepsilon_\gamma \tilde{\sigma}_{pd}(E_m) l_{\text{eff}}(E_m) K(E_m), \quad (9)$$

$$l_{\text{eff}} = \sqrt{\frac{2\pi}{-\varphi^{(2)}(E_m)} \frac{dx}{dE}}(E_m), \quad (10)$$

$$K(E_m) = \int_{E_m}^\infty f(E) dE = \frac{2E_m^{3/2}}{\beta}, \quad (11)$$

где  $l_{\text{eff}}(E_m)$  — эффективный пробег протона в мишени, соответствующий энергии столкновения протона с дейтроном  $E_m$ ;  $E_m$  — значение энергии столкновения протонов с дейтронами мишени, определяемое уравнением для экстремальной точки функции  $\varphi_0(E) = -\beta/\sqrt{E} + \ln \int_E^\infty f(E') dE'$ :  $\beta/E_m^{3/2} - f(E_m)/\int_{E_m}^\infty f(E') dE' = 0$  (данное значение энергии столкновения протонов с дейтронами соответствует положению максимума функции  $P(E)$ );  $\varphi_0^{(2)}(E_m)$  — вторая производная функции  $\varphi_0(E)$  в точке  $E_m$ ;  $K(E_m)$  — доля первоначального потока протонов, давшая вклад в выход гамма-квантов из  $pd$ -реакции, соответствующая энергии столкновения протонов с дейтронами  $E_m$  в с. ц. м.;  $\tilde{\sigma}_{pd}(E_m)$  — эффективное сечение  $pd$ -реакции, соответствующее энергии столкновения протонов с дейтронами  $E_m$ ;  $f(E_m)$  — значение функции распределения протонов, падающих на мишень, зависящее от энергии столкновения в точке  $E_m$ .

Эффективное сечение  $pd$ -реакции, согласно выражению (9), определяется как

$$\tilde{\sigma}_{pd}(E_m) = \frac{N_\gamma^{\text{exp}}}{N_{p(d)} \varepsilon_\gamma n_t l_{\text{eff}}(E_m) K(E_m)}. \quad (12)$$

Как видно из приведенных выражений, для правильной интерпретации полученных данных необходимо иметь однозначную информацию об энергетическом распределении потока протонов, падающих на мишень, о его составе, об эффективности транспортировки пучка протонов от источника ионов до мишени, о вероятности его нейтрализации в процессе транспортировки, о распределении концентрации дейтерия по глубине мишени.

## 2. ПОСТАНОВКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Определение зависимости астрофизического  $S$ -фактора от энергии столкновения протонов с дейтронами в интервале 6,0–23,3 кэВ в дейтериде циркония выполнялось с использованием сильноточного плазменного ускорителя Холла. Регистрация гамма-квантов из  $pd$ -реакции осуществлялась с помощью восьми сцинтилляционных детекторов, на основе кристаллов NaI(Tl) ( $100 \times 100 \times 400$  мм), расположенных вокруг мишени из дейтерида циркония. На рис. 1 приведена схема экспериментальной установки.

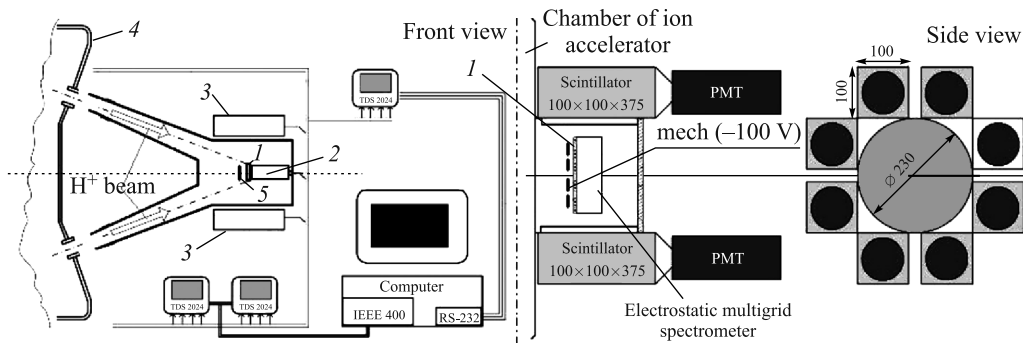


Рис. 1. Экспериментальная установка: 1 — твердотельная мишень из  $ZrD_2$ ; 2 — многосеточный анализатор энергии; 3 — детекторы гамма-квантов на основе кристаллов NaI(Tl); 4 — корпус плазменного ускорителя Холла; 5 — сетка

В качестве мишени использовался дейтерид циркония. Нанесение слоя дейтерида циркония на подложку из нержавеющей стали осуществлялось с помощью методики магнетронного распыления. Толщина нанесенного слоя из дейтерида циркония составляла  $\sim 1,5\text{--}2,0$  мкм. Распределение дейтронов вдоль направления падающего на мишень пучка протонов измерялось на ускорителе Ван де Граафа путем измерения спектров EDR и RBS [30–32]. Измерение энергетического распределения протонов, падающих на мишень, осуществлялось с помощью многосеточного электростатического спектрометра заряженных частиц, а измерение пространственного распределения протонов в пучке производилось с помощью линейки цилиндров Фарадея, установленных по радиусу мишени. Интенсивность ускоренного потока протонов в импульсе составляла  $5 \cdot 10^{14}$  при длительности импульса 10 мкс и частоте следования  $\sim 5 \cdot 10^{-2}$  Гц. Примесь молекулярных ионов водорода в пучке ускоренных протонов составляла  $(9,8 \pm 2,0)\%$  [33], а доля нейтралов, образующихся в результате процесса перезарядки ионов водорода на остаточном газе в измерительной камере ускорителя при транспортировке их от ионного источника до мишени, была меньше 2,4% на 95%-м уровне достоверности [33]. Количество протонов, провазимодействовавших с мишенью в каждом импульсе ускорителя, определялось интегрированием тока мишени. При этом для подавления эмиссии электронов из мишени перед ней устанавливалась сетка (с прозрачностью 93%), находящаяся на расстоянии 1 см под потенциалом  $-100$  В.

Эффективность регистрации гамма-квантов экспериментальной установкой определялась методом Монте-Карло. При пороге регистрирующей аппаратуры 3 МэВ она составила  $\varepsilon_\gamma = 0,300 \pm 0,006$ . Выбор данного энергетического порога был обусловлен необходимостью подавления вклада фона за счет регистрации нейтронов из  $dd$ -реакции, протекание которой возможно из-за наличия примеси дейтронов в пучке протонов (примесь дейтерия в водороде составляла  $\sim 10^{-4}$ ).

В течение эксперимента непрерывно проводились измерения фона, обусловленного космическим излучением и естественной радиоактивностью. Для этого в промежутках между рабочими импульсами ускорителя длительностью 10 мкс, в течение которых пучок ускоренных протонов падал на мишень из  $\text{ZrD}_2$ , регистрировались события фона в течение такого же промежутка времени. Определенный таким образом уровень фона составлял 12–1,5% для диапазона энергий протонов  $E_p = 9,0\text{--}35,0$  кэВ.

В табл. 2 приведены основные данные, полученные при проведении  $pd$ -эксперимента. Значения астрофизического  $S$ -фактора определялись по формуле (4).

На рис. 2 приведена измеренная зависимость астрофизического  $S$ -фактора для  $pd$ -реакции от энергии столкновения протонов с дейтронами в интервале 6,0–23,3 кэВ, полученная с использованием мишени из дейтерида циркония. На этом же рисунке приведены аналогичные зависимости, измеренные в работах [14] и [16].

Как видно из рис. 2, полученные нами значения астрофизического  $S$ -фактора находятся в хорошем согласии с результатами работы [14], выполненной с мишенью, заполненной газообразным дейтерием. Это также свидетельствует о том, что зависимости выходов  $pd$ -реакции, измеренные в дейтериде циркония и в газообразном дейтерии в интервале энергий столкновения протонов с дейтронами 6,0–23,3 кэВ, не различаются между собой в пределах экспериментальных ошибок измерения значений данной величины. А это, в свою очередь, свидетельствует об отсутствии на экспериментально наблюдаемом уровне усиления интенсивности протекания  $pd$ -реакции за счет наличия эффекта электронной экранировки взаимодействующих протонов с дейтронами.

Таблица 2. Экспериментальные данные, полученные в эксперименте с мишенью из дейтерида циркония

$E_p$ , кэВ	$E_{col}$ , кэВ	$N_p$ , $10^{16}$	$E_m$ , кэВ	$S_{pd}$ , эВ · б	$S_0$ , эВ · б	$S'_0$ , эВ · б · кэВ <sup>-1</sup>	$s_{pd}(E_m)$ , $10^{-9}$ б
9	5,28	489,9	5,63	$0,247 \pm 0,036$			0,89
11	6,35	223,2	6,83	$0,253 \pm 0,032$			2,05
13	7,41	137,88	8,03	$0,260 \pm 0,029$			3,84
15	8,45	78,57	9,22	$0,266 \pm 0,027$			6,29
17	9,48	44,73	10,41	$0,272 \pm 0,030$			9,40
19	10,49	25,25	11,59	$0,278 \pm 0,032$			13,13
21	11,49	16,646	12,77	$0,284 \pm 0,031$			17,43
23	12,49	10,44	13,94	$0,290 \pm 0,033$			22,26
25	13,47	8,529	15,12	$0,295 \pm 0,032$	$0,210 \pm 0,001$	$0,0078 \pm 0,0005$	27,56
27	14,44	6,61	16,29	$0,301 \pm 0,031$			33,30
29	15,41	9,39	17,45	$0,307 \pm 0,026$			39,41
30	15,89	5,4	18,03	$0,310 \pm 0,024$			42,60
31	16,37	10,2	18,61	$0,313 \pm 0,027$			45,87
32	16,84	6,19	19,19	$0,315 \pm 0,026$			49,21
33	17,32	7,4	19,77	$0,318 \pm 0,024$			52,62
34	17,79	6,15	20,35	$0,321 \pm 0,023$			56,10
35	18,26	44,636	20,93	$0,324 \pm 0,023$			59,64

Примечание.  $N_p$  — число протонов, попавших в мишень;  $E_{col}$  — средняя энергия столкновения протонов с дейтронами, определяемая уравнением (8);  $E_p$  — энергия протонов, попавших в мишень (в л. с.);  $E_m$  — энергия столкновения протонов с дейтронами, соответствующая максимуму функции  $P(E)$ ;  $S_0$  — значение астрофизического  $S$ -фактора для  $pd$ -реакции, соответствующее энергии столкновения протона с дейтроном, равной нулю;  $S'_0$  — параметр линейной аппроксимации зависимости астрофизического  $S$ -фактора от энергии столкновения протона с дейтроном.

В то же время измеренные нами значения астрофизического  $S$ -фактора превышают результаты [16], полученные с использованием мишени из тяжелой воды ( $D_2O$ ). Такое же расхождение наблюдается между результатами, полученными нами ранее с мишенью из дейтерида циркония [18], и результатами работы [16]. Таким образом, причина такого расхождения с результатами работы [16] остается все еще не ясной.

Наличие растущей линейной зависимости астрофизического  $S$ -фактора с увеличением энергии столкновения протонов с дейтронами  $S_{pd}(E) = S_0 + S'_0 \cdot E$ , измеренной в работах [14, 16], подтверждается в пределах ошибок измерения данными настоящей работы.

На рис. 3 приведена зависимость измеренного эффективного сечения  $pd$ -реакции  $\tilde{\sigma}_{pd}(E_m)$  от энергии столкновения протонов с дейтронами  $E_m$  ( $E_m$  — энергия столкновения протонов с дейтронами в максимуме функции  $P(E)$ ). Значения  $\tilde{\sigma}_{pd}(E_m)$  определялись из уравнения (10) с использованием экспериментально измеренного выхода гамма-квантов из  $pd$ -реакции и вычисленных значений эффективной длины пробега протона в мишени  $l_{eff}(E_m)$  и величины  $K(E_m)$ .

Экспериментально найденные значения эффективного сечения  $pd$ -реакции  $\tilde{\sigma}_{pd}(E_m)$  в интервале энергий столкновения протонов с дейтронами 6,0–23,3 кэВ приведены



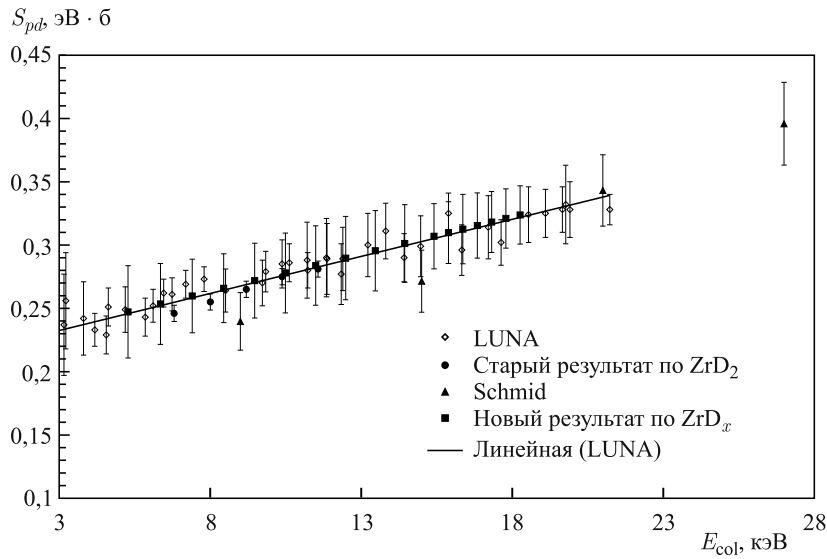


Рис. 2. Зависимости астрофизического  $S$ -фактора для  $pd$ -реакции от энергии столкновения протонов с дейтронами: темные квадраты — настоящая работа; светлые ромбы — работа [14] (опыт с газовой дейтериевой мишенью); темные кружки — наша предыдущая работа [18] с мишенью из дейтерида циркония; темные треугольники — работа [16] (опыт с мишенью из замороженной тяжелой воды); сплошная линия — результаты фитирования данных настоящей работы

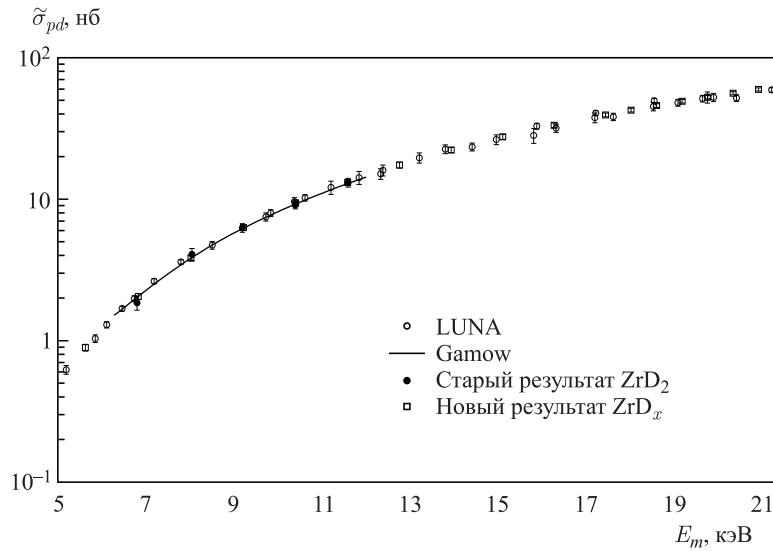


Рис. 3. Зависимость эффективного сечения  $pd$ -реакции от энергии столкновения протонов с дейтронами: темные кружки — результаты настоящей работы, полученные с использованием формулы (10); сплошная кривая — расчетные значения сечения  $pd$ -реакции, вычисленные по формуле (3); светлые кружки — значения эффективных сечений  $pd$ -реакции, измеренные в работе [16]

в табл. 2. Кроме того, на рис. 3 отображены экспериментальные значения эффективного сечения  $pd$ -реакции, измеренные с газообразной дейтериевой мишенью [16].

Хорошее согласие между результатами настоящей работы и работы [14] в плане извлечения информации о величине эффективного сечения  $pd$ -реакции свидетельствует, с одной стороны, о корректности аналитического подхода определения значений величины  $\bar{\sigma}_{pd}(E_m)$  [26], а с другой — об отсутствии электронной экранировки для  $pd$ -реакции, протекающей в дейтериде циркония.

В заключение можно отметить следующее.

1. Результаты настоящей работы по измерению зависимости астрофизического  $S$ -фактора от энергии столкновения протонов с дейтронами в дейтериде циркония совпадают с результатами нашей предыдущей работы [18], полученными в интервале энергий столкновения 7,3–12,7 кэВ.

2. Результаты настоящей работы, полученные для интервала энергий столкновения протонов с дейтронами 12,7–23,3 кэВ, находятся в хорошем согласии с результатами, полученными с использованием газообразной дейтериевой мишени [14].

3. Измеренные значения  $S$ -фактора в указанном интервале энергий столкновения протонов с дейтронами превышают соответствующие значения, полученные в работе [16] с использованием мишени из тяжелой воды  $D_2O$ . Причина расхождения между результатами, полученными нами в настоящей и предыдущей [18] работах и в работе с мишенью из  $D_2O$  [16], остается пока не ясной.

4. Измеренные эффективные сечения  $pd$ -реакции в указанном диапазоне энергии столкновения протонов с дейтронами хорошо описываются формулой (9) с использованием вычисленных значений эффективной длины пробега протонов в дейтериде циркония и величины  $K(E)$ , характеризующей долю протонов, давших вклад в выход гамма-квантов из  $pd$ -реакции.

К настоящему времени ситуация в плане изучения  $pd$ -реакции в металлах, насыщенных дейтерием, следующая.

Результаты двух  $pd$ -экспериментов с мишенью из дейтерида циркония, один из которых выполнен нами ранее [18], а второй — в настоящее время, свидетельствуют об отсутствии на экспериментально наблюдаемом уровне усиления  $pd$ -реакции в интервале энергий 6,0–23,3 кэВ за счет наличия эффекта электронной экранировки взаимодействующих протонов с дейтронами.

Что касается исследования  $pd$ -реакции, протекающей в дейтериде титана, то на экспериментально достоверном уровне нами обнаружено усиление данной реакции в интервале энергий столкновения протонов с дейтронами от 5,3 до 10,5 кэВ [19].

Найденное значение потенциала электронного экранирования для  $pd$ -реакции в дейтериде титана неожиданно оказалось достаточно большим ( $U_e = (242 \pm 64)$  эВ) даже по сравнению с измеренным ранее потенциалом электронного экранирования для  $dd$ -реакции, протекающей в титане ( $U_e = (125 \pm 34)$  эВ [21]).

Природа столь значительного по величине потенциала электронного экранирования для  $pd$ -реакции в дейтериде титана остается пока не известной.

Для прояснения природы столь существенного расхождения в полученных результатах изучения  $pd$ -реакции в дейтеридах титана и циркония необходимо провести изучение данной реакции в дейтериде титана в расширенном диапазоне энергий столкновения протонов с дейтронами, по крайней мере в таком же интервале энергий, как и в случае изучения  $pd$ -реакции в дейтериде циркония.

Подтверждение результатов предыдущей работы [19] позволит прояснить природу различия в механизмах протекания  $pd$ -реакции в дейтериде титана и циркония.

Авторы выражают искреннюю благодарность Вит. М. Быстрицкому за плодотворные дискуссии и постоянный интерес к работе.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Friar J. L. // Proc. of the Intern. Conf. on the Theory of Few Body and Quark-Hadronic System. Dubna, 1987. P. 70.
2. Paetz gen Schieck H. Experiments on Four-Nucleon Reactions // Few Body Syst. 1988. V. 5. P. 171.
3. Kharchenko V. F., Navrotsky M. A., Katerinchuk P. A. Effects of the Coulomb Interaction in Proton-Deuteron Scattering and Radiative Capture at Zero Energy // Yad. Fiz. 1992. V. 55. P. 86.
4. Chulick G. S. et al. Extended Parameterization of Nuclear-Reaction Cross Sections for Few-Nucleon Nuclei // Nucl. Phys. A. 1993. V. 551. P. 255.
5. Torre J., Goulard B. Mesonic Exchange Currents and Radiative Thermal Neutron Capture by the Deuteron // Phys. Rev. C. 1983. V. 28. P. 529.
6. Friar J. L. et al. Nuclear Transition Rates in  $\mu$ -Catalyzed  $p-d$  Fusion // Phys. Rev. Lett. 1991. V. 66. P. 1827.
7. Friar J. L., Gibson B. F., Payne G. L. Thermal  $n-d$  Radiative Capture // Phys. Lett. B. 1990. V. 251. P. 11.
8. Assenbaum H. J., Langanke K., Rolfs C. Effects of Electron Screening of Low-Energy Fusion Cross Sections // Z. Phys. A. 1987. V. 327. P. 461.
9. Bahcall J. N., Pinsonneault M. H. Standard Solar Models, with and without Helium Diffusion, and the Solar Neutrino Problem // Rev. Mod. Phys. 1992. V. 64. P. 885.
10. Belyaev V. B. et al. New Proposals for the Investigation of Strong Interaction of Light Nuclei at Super Low Energies // Nucleonika. 1995. V. 40. P. 85.
11. Fowler W. A. Experimental and Theoretical Nuclear Astrophysics: The Quest for the Origin of the Elements // Rev. Mod. Phys. 1984. V. 56. P. 149.
12. Rolfs C., Rodney W. S. Cauldrons in the Cosmos. Chicago: Univ. of Chicago Press, 1988.
13. Stahler S. W. Deuterium and the Stellar Birthline // Astrophys. J. 1988. V. 332. P. 804.
14. Casella C. et al. First Measurement of the  $d(p, \gamma)^3\text{He}$  Cross Section down to the Solar Gamow Peak // Nucl. Phys. A. 2002. V. 706. P. 203.
15. Griffiths G. M., Lal M., Scarfe C. D. The Reaction  $D(p, \gamma)^3\text{He}$  below 50 keV // Can. J. Phys. 1963. V. 41. P. 724.
16. Schmid G. J. et al. The  $^2\text{H}(p \rightarrow, \gamma)^3\text{He}$  and  $^1\text{H}(d \rightarrow, \gamma)^3\text{He}$  Reactions below 80 keV // Phys. Rev. C. 1997. V. 56. P. 2565.
17. Bystritsky V. M. et al. Study of the  $pd$  Reaction in the Astrophysical Energy Region Using the Hall Accelerator // Nucl. Instr. Meth. A. 2008. V. 595. P. 543.
18. Bystritsky V. M. et al. Study of the  $d(p, \gamma)^3\text{He}$  Reaction at Ultralow Energies Using a Zirconium Deuteride Target // Nucl. Instr. Meth. A. 2014. V. 737. P. 248–252.
19. Bystritsky V. M. et al. First Experimental Evidence of  $D(p, \gamma)^3\text{He}$  Reaction in Deuteride Titanium in Ultralow Collision Energy Region // Ibid. V. 753. P. 91–96.
20. Viviani M., Schiavilla R., Kievsky A. Theoretical Study of the Radiative Capture Reactions  $^2\text{H}(n, \gamma)^3\text{H}$  and  $^2\text{H}(p, \gamma)^3\text{He}$  at Low Energies // Phys. Rev. C. 1996. V. 54. P. 553.

21. Bystritsky V. M. et al. Measurement of Astrophysical  $S$  Factors and Electron Screening Potentials for  $d(d, n)^3\text{He}$  Reaction in  $\text{ZrD}_2$ ,  $\text{TiD}_2$ ,  $\text{D}_2\text{O}$ , and  $\text{CD}_2$  Targets in the Ultralow Energy Region Using Plasma Accelerators // Phys. At. Nucl. 2012. V. 75. P. 53–62.
22. Bystritsky V. M. et al. Investigation of Temperature Dependence of Neutron Yield and Electron Screening Potential for the  $d(d, n)^3\text{He}$  Reaction Proceeding in Deuterides  $\text{ZrD}_2$  and  $\text{TiD}_2$  // Ibid. P. 913–922.
23. Bystritsky V. M. et al. Measurement of Astrophysical  $S$ -Factors and Electron Screening Potentials for View the  $d(d, n)^3\text{He}$  Source Reaction in  $\text{ZrD}_2$ ,  $\text{TiD}_2$  and  $\text{TaD}_{0.5}$  Targets in the Ultralow Energy Region Using Plasma Accelerator // Nucl. Phys. A. 2012. V. 889. P. 93–104.
24. Raiola F. et al. Enhanced  $d(d, p)t$  Fusion Reaction in Metals // Eur. Phys. J. A. 2006. V. 27. P. 79, and references therein.
25. Raiola F. et al. Enhanced Electron Screening in  $d(d, p)t$  for Deuterated Metals // Eur. Phys. J. A. 2004. V. 19. P. 283.
26. Czerny K. et al. Measurements of Enhanced Electron Screening in  $d + d$  Reactions under UHV Conditions // J. Phys. G: Nucl. Part. Phys. 2008. V. 35. P. 014012.
27. Huke A. et al. Measurement of the Enhanced Screening Effect of  $d + d$  Reaction in Metals // Nucl. Instr. Meth. B. 2007. V. 256. P. 599.
28. Huke A. et al. Enhancement of Deuteron-Fusion Reactions in Metals and Experimental Implications // Phys. Rev. C. 2008. V. 78. P. 015803.
29. Bystritsky V. M., Pen'kov F. M. Analytic Estimates of the Product Yields for Nuclear Reaction in the Ultralow Energy Range // Phys. At. Nucl. 2003. V. 66. P. 75–80.
30. Kobzev A. P. et al. Investigation of Light Element Contents in Subsurface Layers of Silicon // Vacuum. 2009. V. 83. P. S124.
31. Wei-Kan Chu, Mayer J. W., Nicolet M. A. Backscattering Spectrometry. New York; San Francisco; London: Acad. Press, 1978.
32. Yagi H. et al. Elastic Recoil Detection Analysis for Hydrogen near the Surface of Chemical-Vapor-Deposited Diamond // Japan J. Appl. Phys. 1995. V. 34. P. L577.
33. Bystritsky V. M. et al. Research Methods for Parameters of Accelerated Low-Energy Proton Beam // Part. Nucl. Lett. 2015. V. 12, No. 4(195) (in press).

Получено 30 января 2015 г.