

УДК 539.172

В. В. Мицук^{1,2}, *М. В. Мордовской*^{1,2}¹Московский физико-технический институт (государственный университет)²Институт ядерных исследований РАН

Координатный детектор для регистрации заряженных частиц на основе матрицы кремниевых фотоумножителей и сцинтилляционных кристаллов LYSO

Для регистрации энергии и определения множественности заряженных частиц в исследованиях по изучению синглетных квазисвязанных nn -, pp - и np -состояний двухнуклонной системы (E_{nn}^s , E_{pp}^s , E_{np}^s) предлагается использовать матричный детектор на основе кремниевых фотоумножителей и сцинтилляционных кристаллов LYSO. В работе приведены результаты измерения параметров прототипа такого детектора, состоящего из 4-х детектирующих секций (при полном наборе в 16). Определялся стандартный набор параметров: разрешения (временное, амплитудное), относительные эффективности, собственный фон, коэффициенты усиления и т.д. и их зависимости от напряжения и температуры. Определены эффективности применения различных вариантов оптического контакта при установке кристаллов на кремниевый фотоумножитель. Обсуждаются вопросы применения подобного детектора в экспериментах при изучении реакций взаимодействия малонуклонных ядер.

Ключевые слова: ядерная реакция, сцинтилляционный кристалл, амплитудное разрешение, временное разрешение, собственный фон, оптический контакт, двухнуклонные состояния.

*V. V. Mitcuk*¹, *M. V. Mordovskoy*²¹Moscow Institute of Physics and Technology²Institute for Nuclear Research (INR) of the Russian Academy of Sciences

A coordinate detector based on a matrix of silicon photomultipliers and scintillation LYSO crystals for charged particles registration

We propose to use a matrix detector based on silicon photomultipliers and LYSO scintillation crystals to register energy and determine the multiplicity of charged particles for study of quasibound nn -, pp - and np -states of the dinucleon system (E_{nn}^s , E_{pp}^s , E_{np}^s). Results of measuring the prototype parameters of the detector consisting of 4 detecting sections (with a full set of 16) are demonstrated in the article. A standard set of parameters is defined, viz. resolution (time, amplitude), relative efficiencies, intrinsic radiation spectrum, gain factors, etc. and their dependence on voltage and temperature. The results of the application of some variants for optical contact between crystals and a Si-photomultiplier are described. The use of such detectors in experiments for studying of the light nuclei interaction is discussed.

Key words: nuclear reaction, scintillation crystal, amplitude resolution, time resolution, own background, optical contact, dinucleon states.

1. Исследуемая ядерная реакция. Расчет кинематических параметров системы

Одной из интересных задач современной физики является изучение нарушения зарядовой симметрии (НЗС) ядерных сил, которое обычно связывают с различием масс u - и d -кварков, их зарядов и магнитных моментов. Для получения количественной оценки эффекта НЗС необходимы данные об энергиях синглетных двухнуклонных состояний. Такая информация может быть получена при исследовании реакций с двумя нуклонами в конечном состоянии. Примером исследования по данной проблеме может служить задача, состоящая в определении энергий синглетных квазисвязанных nn -, pp - и np -состояний двухнуклонной системы (E_{nn}^s , E_{pp}^s , E_{np}^s) в рамках единой экспериментальной схемы [1, 2].

В Лаборатории атомного ядра ИЯИ РАН проводятся работы по исследованию реакции $d + d \rightarrow p + p + n + n$. Эта реакция может идти с образованием на первом этапе (до развала) различных синглетных двухнуклонных систем: $d + d \rightarrow (nn)^s + (pp)^s$ или $d + d \rightarrow (np)^s + (np)^s$.

Разрабатываемый детектор предполагается использовать при исследовании первого варианта $d + d \rightarrow (nn)^s + (pp)^s$ (рис. 1) для регистрации конечных протонов (т.н. E -детектор полного поглощения). Изучение последующего распада этих состояний в кинематически полном эксперименте позволит определить энергии синглетных состояний, а анализ полученных данных позволит судить о мере нарушения зарядовой симметрии ядерных сил.

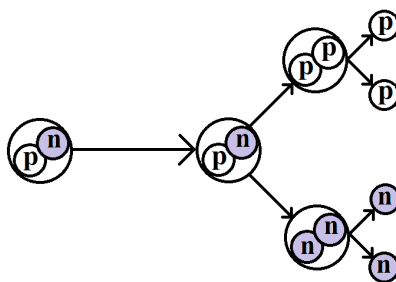


Рис. 1. Схема исследуемой реакции $d + d \rightarrow (pp) + (nn)$

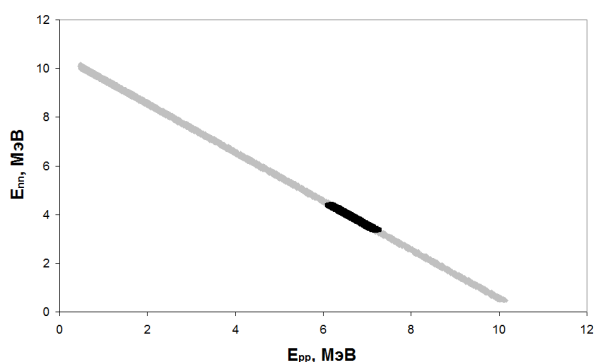


Рис. 2. Двумерная диаграмма $E_{pp}-E_{nn}$ реакции $d + {}^2\text{H} \rightarrow (nn)^s + (pp)^s$

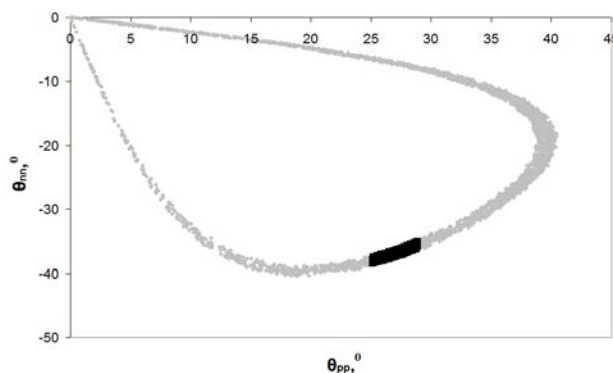


Рис. 3. Двумерная диаграмма $\Theta_{pp}-\Theta_{nn}$ реакции $d + {}^2\text{H} \rightarrow (nn)^s + (pp)^s$

Было проведено моделирование планируемого эксперимента. Созданная программа моделирования [3] позволяет проводить выбор геометрии эксперимента, рассчитывать времена пролета и энергии всех вторичных частиц и, соответственно, задавать ограничения на допустимые параметры детекторов. Для примера на рис. 2 и 3 приведены двумерные диаграммы $E_{pp}-E_{nn}$ и $\Theta_{pp}-\Theta_{nn}$. Исходя из этих диаграмм, выбираются сопряженные углы вылета двухнуклонных систем, которым будут соответствовать и определенные интервалы

энергий развальных частиц (темным тоном выделены выбираемые интервалы). По таким диаграммам определены минимально необходимые параметры E -детектора: диапазон регистрируемой энергии протонов от 0 до 7,5 МэВ, энергетическое разрешение не хуже 30% при 1 МэВ, временное — не хуже 1 нс и возможность одновременной регистрации двух протонов на расстоянии не более 5 мм.

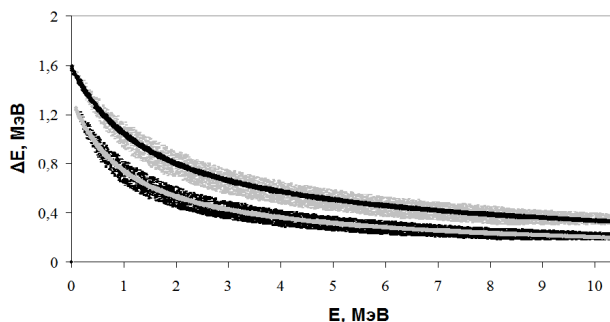


Рис. 4. $\Delta E - E$ -диаграмма: тонкие серая и черная линии соответствуют регистрации протонов и дейтронов соответственно в случае идеального разрешения детектора; широкие черная и серая полосы – регистрация протонов и дейтронов соответственно в случае разрешения 30%

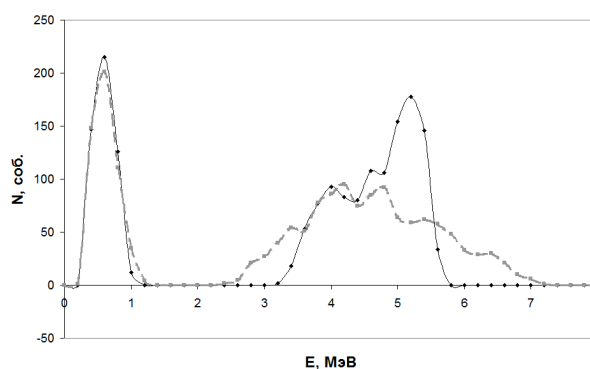


Рис. 5. Спектры энергии протонов при идеальном разрешении (сплошная кривая) и разрешении 30% (штрихпунктир)

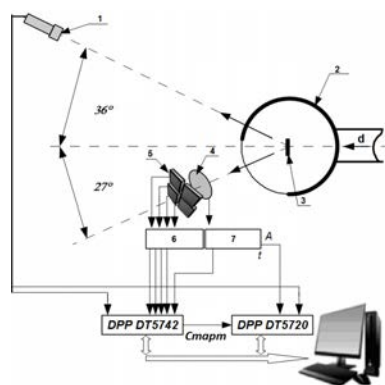


Рис. 6. Схема эксперимента: 1 – нейтронный детектор N1, 2 – камера рассеяния, 3 – CD_2 -мишень, 4 – ΔE -детектор, 5 – E -детектор, 6 – предусилитель матрицы SiФЭУ, 7 – предусилитель ΔE -детектора; DPP DT5742 и DPP DT5720 – цифровые сигнальные процессоры

Тип частицы в данном эксперименте определяется по стандартной схеме $\Delta E - E$ разделения. На рис. 4 приведены результаты моделирования для этой диаграммы. Видно, что разрешения E -детектора в 30% достаточно для уверенного разделения протонов и дейтронов.

При моделировании спектра энергии протонов (рис. 5) наблюдаются два пика, расстояние между которыми в соответствии с формулой $E^* = [E_1 + E_2 - 2(E_1 \cdot E_2)^{\frac{1}{2}} \cdot \cos(\Theta_1 \Theta_2)]/2$ (здесь E_1 , Θ_1 и E_2 , Θ_2 – энергии и углы вылета «развальных» протонов) позволяет определить энергию связанного состояния (pp). На рисунке видно, что изменение разрешения от идеального до 30% оставляет возможность определения энергии связанного состояния.

Схема эксперимента представлена на рис. 6: нейтрон будет детектироваться жидким водородосодержащим сцинтиллятором, расположенным под углом $\sim 36^\circ$, близким к углу вылета pn -системы (справа от направления первичного пучка), два протона будут регистрироваться $\Delta E - E$ телескопом, установленным под расчетным углом 27° . Все детекторы располагаются в единой горизонтальной плоскости реакции. Энергия нейтронов

определяется по времени пролета нейтронов до детектора, при этом в качестве стартового сигнала времяпролетной системы будет использован сигнал от E - либо ΔE -детектора, регистрирующего протоны. В качестве ΔE -детектора используется полностью обедненный поверхностно-барьерный кремниевый детектор с толщиной ~ 25 мкм. E -детектором должна служить матрица из детекторов, минимально 2×2 , с максимальными размерами чувствительной области каждого $3 \text{ мм} \times 3 \text{ мм}$. При этом будет шесть возможных комбинаций детектирования пары протонов в совпадении.

В соответствии с результатами моделирования был спроектирован координатный E -детектор.

2. E -детектор

Внешний вид первого варианта детектора представлен на рис. 7. Детектор создан на основе кристаллов LYSO и матрицы кремниевых фотоумножителей SiФЭУ ARRAYC-30035-16P-PCB фирмы SENSLE.

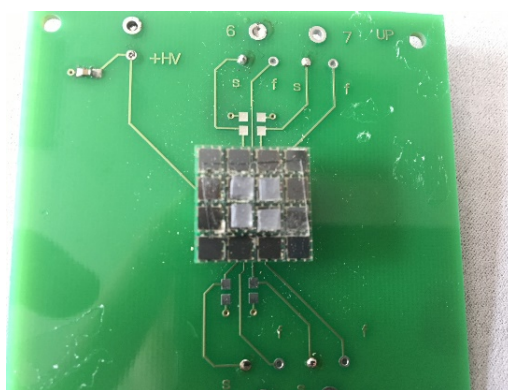


Рис. 7. Внешний вид координатного детектора для регистрации заряженных частиц

Матрица состоит из 16 SiФЭУ, в данном варианте детектора пока используются только четыре центральных. Матрицы SENSLE имеют ряд преимуществ: высокая степень надежности, гарантированно одинаковые параметры составляющих, малый темновой ток, высокий коэффициент усиления, дополнительный быстрый выход для временных измерений [4].

Были использованы сцинтиляционные кристаллы LYSO размерами $3 \times 3 \times 2 \text{ мм}^3$, самостоятельно изготовленные из кристаллов стандартных размеров $3 \times 3 \times 12 \text{ мм}^3$.

Выбор кристаллов LYSO и их размеров основан на следующих требованиях: отсутствие входного окна у кристалла (регистрируются заряженные частицы, поэтому исключаются все гигроскопичные кристаллы), хорошее энергетическое разрешение, полное поглощение частиц с энергией до 10 МэВ. Использование матричного полупроводникового детектора в данном случае предпочтительнее, но не проходит по экономическим соображениям.

2.1. Изучение характеристик детектора

Была проведена калибровка детектора и определены амплитудное и временное разрешения. В целях определения рабочей области напряжений детектора была снята зависимость разрешения от напряжения, приложенного к детектору. В измерениях использовались источники α - и γ -излучения ОСГИ.

При определении временного разрешения использовалась стандартная методика одновременной регистрации двух γ -квантов от бета-распада ^{22}Na (рис. 8). Вторым детектором служил детектор N1 основной установки (см. рис. 6), сделанный на основе сцинтиллятора EJ-301 и ФЭУ Hamamatsu R636-10, с временным разрешением $\sim 0,2 \text{ нс}$.

Цифровой сигнальный процессор CAEN DT5742 имеет шаг оцифровки по времени 0,2 нс, достаточный для определения временного разрешения исследуемого детектора.

Была получена зависимость временного разрешения детектора от прикладываемого к нему напряжения (рис. 9). В диапазоне 31–32 В временное разрешение (0,6–1 нс) достаточно для вычисления энергии нейтрона.

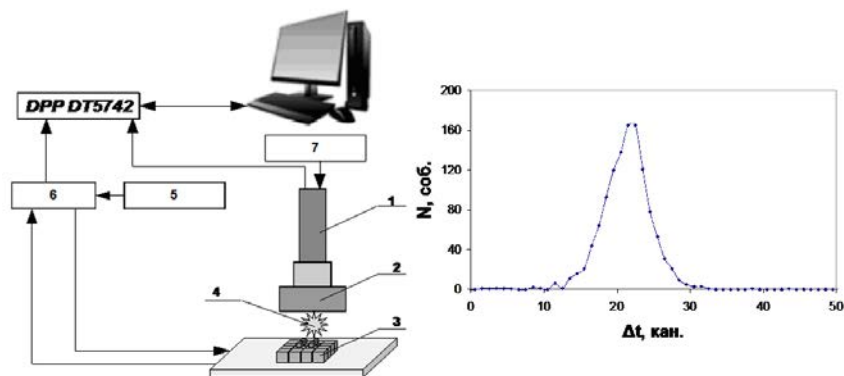


Рис. 8. Схема эксперимента по определению временного разрешения детектора: 1 – ФЭУ, 2 – сцинтиллятор EJ-301, 3 – исследуемый детектор, 4 – источник ОСГИ ^{22}Na , 5 – регулируемый источник напряжения для SiФЭУ, 6 – многоканальный усилитель, 7 – источник высокого напряжения, DT5742 – цифровой сигнальный процессор. Справа пример спектра разницы времен регистрации сигнала исследуемым детектором и детектором $N1$ (при обработке сигналов использовался метод FSP)

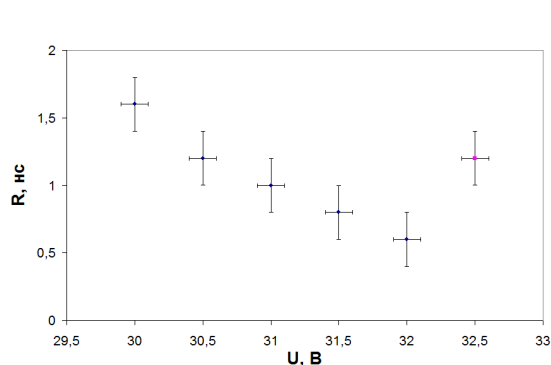


Рис. 9. Зависимость временного разрешения от напряжения

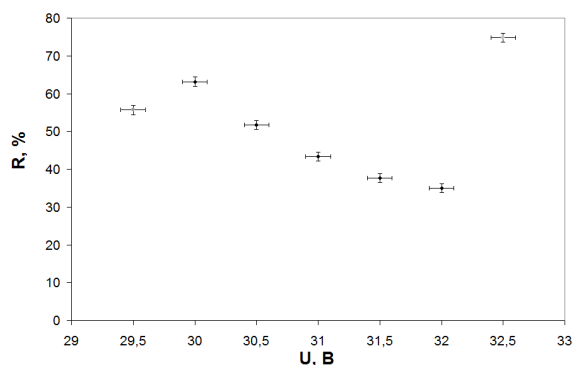


Рис. 10. Зависимость разрешения детектора по линии 511 кэВ от прикладываемого напряжения

Были получены аналогичные зависимости амплитудного разрешения от напряжения смещения для γ -линий источников ОСГИ различных энергий. На рис. 10 приведена такая зависимость для энергии 511 кэВ источника ^{22}Na , а на рис. 11 – амплитудный спектр этого источника, снятый при напряжении смещения $U_{\text{см}} = 31$ В.

Полученное значение амплитудного разрешения в диапазоне напряжений смещения 31–32 В ($\leq 30\%$ для 0,5 МэВ) удовлетворяет минимальным требованиям к детектору по условиям планируемого эксперимента.

2.2. Особенности проектирования детектора: исследование собственного фона детектора и создание оптического контакта матрицы фотодиодов и кристалла LYSO

Кристалл LYSO ($\text{Ce}_z\text{Lu}_{2-x-z}\text{Y}_x\text{SiO}_5$, где $0,05 < x < 1,95$ и $0,001 < z < 0,02$) имеет собственный радиоактивный фон, обусловленный наличием изотопа лютеция ^{176}Lu . На рис. 11 приведен амплитудный спектр собственного фона детектора. Для сравнения здесь же приведены спектры источников ^{22}Na и ^{137}Cs , измеренные детектором в тех же условиях.

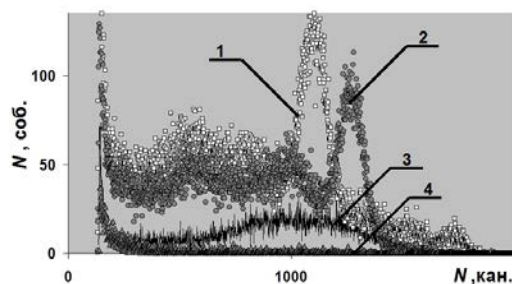


Рис. 11. Формы амплитудных спектров детектора. Время измерения – 15 минут. 1 и 2 – спектры излучения от источников ^{22}Na ($10^3/\text{с}$) и ^{137}Cs ($10^3/\text{с}$), деленные на 10^2 ; 3 – фоновый спектр, 4 – спектр сигналов кремниевой матрицы в отсутствии кристалла LYSO, умноженный на 10^2

Собственный фон детектора не должен оказать заметного влияния на результаты планируемого эксперимента, поскольку условие совпадения сигналов с сигналами ΔE -детектора и нейтронного детектора в узком временном диапазоне значительно ослабит его.

При проектировании детектора был проведен подбор материалов для создания оптического контакта между кристаллом LYSO и матрицей фотодиодов. Известно, что оптический контакт значительно влияет на процесс светосбора и, соответственно, на результирующие разрешения.

Были проведены испытания нескольких вариантов материалов с измерениями амплитудных спектров источников γ - и α -излучения. Определялись максимальные амплитуда сигналов и разрешение. Далее приведен список использованных материалов и «эффективность» (в скобках приведено отношение максимума сигнала к максимуму сигнала на диффузионном масле):

- масло диффузионное (1),
- глицерин (0,93),
- оптический вазелин (0,87),
- двусторонний скотч 3М 9473 VHB, диспенсер – пленка (0,87),
- силиконовый компаунд Silgel 612 (A, B) производства Wacker (0,83),
- двусторонний скотч 3М 9473 VHB, диспенсер – бумага (0,73),
- канадский бальзам (0,68).

Исходя из конструктивных соображений был сделан выбор в пользу двустороннего скотча 3М 9473 VHB, с пленкой в качестве диспенсера.

3. Проверка системы из нескольких детекторов

Аналогичные измерения проведены для всех четырех детекторов, входящих в матричную сборку. Получены практически одинаковые результаты (рабочая точка, разрешения и т.д.) для всех вариантов. При облучении матрицы коллимированным источником излучений исследовалось влияние каждого из четырех детекторов друг на друга. Каких-либо перекрестных зависимостей не обнаружено.

Была также проверена зависимость разрешений (амплитудного и временного) детектора от температуры. Исследование проводилось при помещении детектора в стационарный хладотермостат ХТ-3/70-2. Значительного изменения разрешений не обнаружено (в пределах 1–2% при охлаждении на 20 градусов), что близко к температурной зависимости коэффициента усиления SiФЭУ, но меньше ожидаемого для всего детектора. Это объясняется тем, что на данном этапе разработки сами значения разрешений далеки от оптимальных и определяются в основном качеством кристаллов. При планируемой в ближайшее время доработке детектора ожидается улучшение параметров разрешения. Температурные измерения будут проведены повторно.

4. Заключение

Спроектирован и собран координатный детектор для регистрации заряженных частиц на основе матрицы кремниевых фотоумножителей и сцинтилляционных кристаллов LYSO. Цель создания детектора – его применение для исследований в области физики легких ядер, в частности для определения энергии связанного состояния (pp), которое образуется в результате реакции $d + d \rightarrow (pp) + (nn)$. Были измерены временное, амплитудное, пространственное разрешения. Определен рабочий диапазон напряжений смещения. Выбрана рабочая точка. Определен собственный фон детектора и его влияние на применение детектора для измерений. Были проведены измерения по определению зависимости разрешения детектора от температуры. Путем исследования спектров определен наилучший материал для создания оптического контакта между кристаллами и матрицей SiФЭУ. Данная конструкция и измеренные параметры детектора уже удовлетворяют условиям эксперимента. В ближайшее время планируется модернизация детектора (замена кристаллов) для достижения лучших значений энергетического разрешения ($\sim 15\%$).

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 16-32-00743.

Литература

1. Зуев С.В., Каспаров А.А., Конобеевский Е.С., Мордовской М.В., Железных И.М., Гасанов А.Г., Лебедев В.М., Спасский А.В. Установка для изучения NN-корреляций в реакции $d + {}^2\text{H} \rightarrow n + n + p + p$ // Известия Российской академии наук. Серия физическая. 2016. Т. 80. С. 254–259.
2. Конобеевский Е.С., Зуев С.В., Каспаров А.А., Лебедев В.М., Мордовской М.В., Спасский А.В. Исследование реакции $d + d \rightarrow {}^2\text{He} + {}^2n$ при энергии дейтронов 15 МэВ // ЯФ. 2015. Т. 78, № 7–8. С. 1–9.
3. Зуев С.В., Каспаров А.А., Конобеевский Е.С. Программа моделирования экспериментов по исследованию реакций с тремя частицами в конечном состоянии // Известия Российской академии наук. Серия физическая. 2014. Т. 78. С. 527–531.
4. Информация сайта компании SENS� [Электронный ресурс] URL: <http://www.sensl.com/downloads/ds/DS-ArraySB-4.pdf> (дата обращения: 02.04.2017).

References

1. Zuyev S.V., Kasparov A.A., Konobeevski E.S., Mordovskoy M.V., Zheleznykh I.M., Gasanov A.G., Lebedev V.M., Spassky A.V. An installation for study of NN-correlations in a reaction $d + {}^2\text{H} \rightarrow n + n + p + p$. Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics. 2016. V. 80. P. 254–259. (in Russian).
2. Konobeevski E.S., Zuyev S.V., Kasparov A.A., Lebedev V.M., Mordovskoy M.V., Spassky A.V. Study of a reaction $d + d \rightarrow {}^2\text{He} + {}^2n$ with energy of deutrones of 15 MeV. Physics of Atomic Nuclei. 2015. V. 78, N 7–8. P. 1–9. (in Russian).
3. Zuyev S.V., Kasparov A.A., Konobeevski E.S. A program for simulation experiments to study reactions with three particles in the final state. Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics. 2014. V. 78. P. 527–531. (in Russian).
4. Data from the company SENS� site [Electronic source] URL: <http://www.sensl.com/downloads/ds/DS-ArraySB-4.pdf> (date of the application: 02.04.2017).

Поступила в редакцию 30.08.2017