

РЕГИСТРАЦИЯ НЕЙТРОНОВ С ПОМОЩЬЮ ПРОПОРЦИОНАЛЬНЫХ СЧЕТЧИКОВ НА УСТАНОВКЕ ГЕЛИС

© 2020 г. О. Д. Далькаров^а, М. А. Негодаев^а,
А. С. Русецкий^{а,*}, А. П. Чубенко^а, А. Л. Щепетов^а

^а Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН
Россия, 119991, Москва, Ленинский просп., 53

*e-mail: ruseckijas@lebedev.ru

Поступила в редакцию 08.02.2019 г.

После доработки 31.07.2019 г.

Принята к публикации 05.08.2019 г.

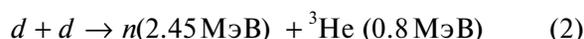
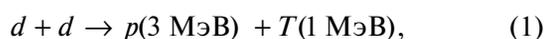
Описана система регистрации нейтронов с помощью пропорциональных счетчиков на установке ГЕЛИС, созданной в ФИАН, а также системы формирования, дискриминации, считывания, оцифровки и обработки сигналов от 36 пропорциональных нейтронных счетчиков СНМ18. Расположение счетчиков по всем направлениям вокруг исследуемой мишени позволило провести ряд экспериментов по исследованию угловых зависимостей выходов нейтронов от DD-реакции в дейтерированных кристаллических структурах при энергиях дейтронов 10–25 кэВ, а также по стимулированию DD-реакции пучками ионов.

DOI: 10.31857/S0032816220010127

ВВЕДЕНИЕ

Установка ГЕЛИС [1], 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 килоэлектронвольт, 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.

Для детектирования продуктов DD-реакций



использовались многоканальный детектор нейтронов на основе счетчиков с наполнением ${}^3\text{He}$ и трековый детектор CR-39. Схемы расположения детектора нейтронов и мишени на установке ГЕЛИС представлены на рис. 1.

Многоканальная система на основе 36 пропорциональных нейтронных счетчиков СНМ18 обладает высокой чувствительностью к нейтронам и позволяет покрыть все интересующие направления их вылета из мишени.

1. ПРОПОРЦИОНАЛЬНЫЕ НЕЙТРОННЫЕ СЧЕТЧИКИ

Для регистрации нейтронов, которые могут рождаться при воздействии пучка ионов на дейтерированные мишени в установке ГЕЛИС, служит сборка из 36 пропорциональных нейтронных счетчиков СНМ18, компактно расположенных вне слоя электромагнитной защиты, окружающей экранированный объем вокруг высоковольтного генератора. Каждый такой счетчик имеет металличе-

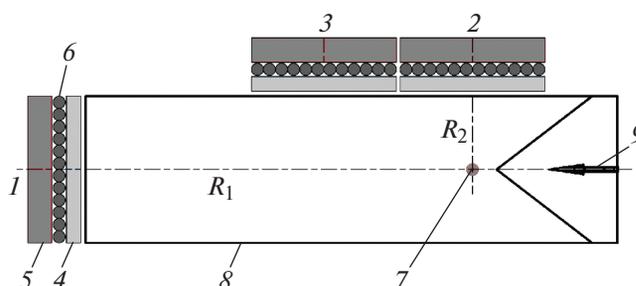


Рис. 1. Схема расположения нейтронного детектора на установке ГЕЛИС. 1–3 – положения трех групп ${}^3\text{He}$ -счетчиков детектора ($R_1 = 85 \text{ см}$, $R_2 = 38 \text{ см}$); 4 – замедлитель 1 (оргстекло 3 см); 5 – замедлитель 2 (парафин 5 см); 6 – ${}^3\text{He}$ -счетчики; 7 – место расположения мишени; 8 – контуры установки ГЕЛИС; 9 – направление пучка ионов.

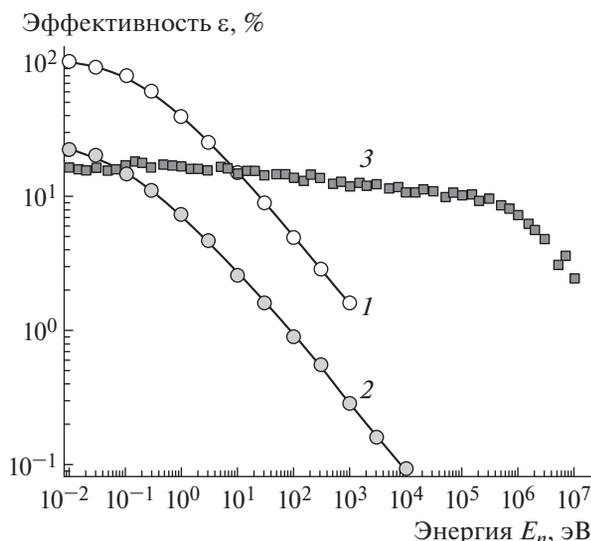


Рис. 2. Эффективность регистрации нейтронов в зависимости от их энергии (результат Geant4-моделирования). 1 — соответствует случаю с “идеальным” распределением начальных импульсов нейтронов, попадающих в единственный счетчик СНМ18, 2 — случаю изотропного распределения, 3 — конфигурации детектора на 12 счетчиках СНМ18 с замедлителем (см. рис. 1), находящегося в изотропном потоке налетающих нейтронов.

ский корпус с внешним диаметром 30 мм и длиной 0.3 м, заполненный смесью аргона и обогащенного до 80–90% изотопом ^3He гелия. Парциальное давление каждого из заполняющих счетчик газов составляет 2 атм. Регистрация нейтронов в счетчике данного типа основана на ядерной реакции $n(^3\text{He}, ^3\text{H})p$, заряженные продукты которой вызывают развитие электронной лавины во внутреннем объеме счетчика, находящегося под рабочим напряжением (1600–1700 В), что приводит к генерации электрического импульса отрицательной полярности на его анодной нити.

Для расчета интенсивности нейтронного потока по данным о скорости счета импульсных сигналов, которые наблюдаются на выходе такого детектора, необходимо знать его эффективность, т.е. вероятность регистрации каждого попавшего в детектор нейтрона. В случае детектора-сборки из 12 счетчиков СНМ18 значения эффективности для широкого диапазона энергий E_n нейтронного потока рассчитывалась путем полного моделирования процессов распространения и взаимодействия с веществом детектора как самих налетающих нейтронов, так и частиц-продуктов, которые рождаются в генерируемых этими нейтронами ядерных реакциях. В расчетах, проведенных на основе известного пакета моделирования взаимодействий элементарных частиц Geant4 [2], внешняя геометрия детектирующих нейтроны элементов и состав их внутреннего газового на-

полнения задавались в соответствии с конструкцией реальных счетчиков СНМ18 и конфигурацией нейтронного детектора в эксперименте ГЕЛИС.

Полученная в результате расчетов зависимость эффективности регистрации нейтронов от их энергии представлена на рис. 2. При рассмотрении отдельных счетчиков СНМ18 расчет проводился в двух вариантах: для “идеального” случая, когда начальное положение первичного нейтрона задавалось непосредственно на внешней поверхности счетчика СНМ18, а его импульс был направлен строго перпендикулярно этой поверхности в сторону внутреннего объема счетчика (кривая 1 на рис. 2), и для счетчика, находящегося в изотропном потоке налетающих нейтронов (кривая 2).

Существенно расширить энергетический диапазон регистрируемых энергий и добиться равномерной чувствительности нейтронного детектора внутри этого диапазона можно, окружая нейтронные счетчики легким водородсодержащим веществом, которое играет роль замедлителя нейтронов. С этой целью в состав нейтронного детектора введены два слоя замедлителя из оргстекла (толщиной 3 см) и парафина (толщиной 5 см), с обеих сторон закрывающие сборку нейтронных счетчиков (см. рис. 1). Расчет по программе Geant4 для модели, содержащей 12 счетчиков СНМ18 и два слоя замедлителя, соответствующей конфигурации реального детектора-сборки, и для изотропного распределения налетающих на детектор нейтронов приводит к зависимости $\epsilon(E_n)$ — кривой 3 на рис. 2. Как следует из этого результата, детекторы обладают эффективностью $\epsilon \sim 10\text{--}13\%$ для широкого диапазона энергии нейтронов от тепловых до ~ 1 МэВ.

Электрические импульсы, которые вырабатываются счетчиком, усиливаются и формируются посредством схем импульсных дискриминаторов, а затем их интенсивность (количество импульсных сигналов, поступивших в единицу времени, амплитуда которых превышает порог срабатывания дискриминатора) подсчитывается с помощью цифровых пересчетных схем.

Для настройки порога срабатывания дискриминаторов амплитудные спектры импульсов счетчиков определялись экспериментально. Измерения проводились в двух вариантах: при регистрации счетчиком исключительно фоновых нейтронов низкой энергии из окружающей среды и при облучении счетчика, дополнительно к природному фону, тепловыми нейтронами от Pu-Be-источника, который располагался внутри замедлителя, изготовленного в виде парафинового цилиндра с толщиной стенки 3 см. Пример амплитудных спектров такого рода приведен на рис. 3.

Видно, что при штатных условиях работы счетчика спектр импульсов от тепловых нейтро-

нов природного фона располагается в пределах 1.5–5 мВ, а в области малых амплитуд (<0.4 мВ) наблюдается резкий рост интенсивности импульсных сигналов, что, очевидно, обусловлено собственными шумами счетчика. При облучении счетчика нейтронами от Pu-Be-источника на подобный же спектр срабатываний, вызываемых чисто нейтронными сигналами, накладывается большое количество импульсов малой амплитуды (<1–1.5 мВ), которые, предположительно, объясняются достаточно эффективной регистрацией счетчиком γ -лучей, которые образуются при захвате тепловых нейтронов ядрами водорода внутри замедлителя.

Из спектров на рис. 3 следует, что для стабильной регистрации нейтронных сигналов в эксперименте порог срабатывания амплитудных дискриминаторов необходимо устанавливать несколько ниже левой границы спектра нейтронных импульсов, но выше амплитуды основной массы сигналов от γ -излучения и шумовых срабатываний счетчика. На рис. 3 соответствующее этим требованиям положение порога отмечено стрелкой *T*.

2. СХЕМЫ ПОДКЛЮЧЕНИЯ НЕЙТРОННЫХ СЧЕТЧИКОВ И ФОРМИРОВАНИЯ ИХ СИГНАЛОВ

Выходные импульсные сигналы с анодной нити каждого счетчика, имеющие амплитуду порядка нескольких милливольт, подаются на входы неинвертирующих предварительных усилителей, которые монтируются в непосредственной близости от анодного вывода счетчика. Усиленные в ~20 раз импульсные сигналы передаются по экранированным кабелям на плату амплитудных дискриминаторов, которые могут располагаться на достаточном удалении (5–10 м) от сборки детекторов и обеспечивают окончательное формирование сигналов, вырабатывая стандартизированные по амплитуде прямоугольные импульсы с амплитудой порядка нескольких вольт; каждому нейтронному счетчику на плате соответствует свой индивидуальный канал дискриминатора.

Поскольку в рассматриваемой схеме не проводится никакого дополнительного формирования выходных сигналов дискриминатора по их длительности, предельная скорость счета импульсов в каждом информационном канале определяется временным разрешением газоразрядного счетчика СНМ18. Максимальная скорость счета составляет $\sim 2 \cdot 10^5$ импульсов/с. Принимая во внимание площадь внешней поверхности замедлителя в нейтронных детекторах ($\sim 10^3$ см²) и эффективность регистрации нейтронов (~ 0.1 , см. рис. 2), можно получить оценку максимально измеряемого потока нейтронов $\sim 2 \cdot 10^3$ см⁻² с⁻¹.

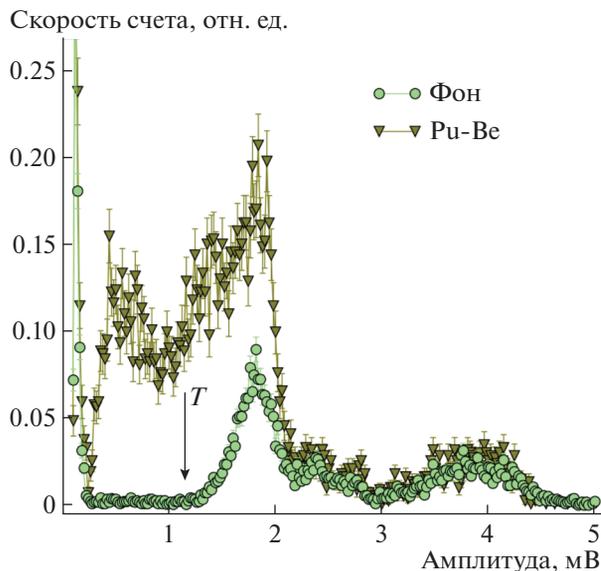


Рис. 3. Амплитудные спектры импульсов, снимаемых с анодной нити счетчика СНМ18 при регистрации нейтронного фона из окружающей среды (1) и облучении счетчика тепловыми нейтронами от экранированного замедлителем Pu-Be-источника (2). Стрелкой *T* отмечено положение порога амплитудной дискриминации импульсов, принятого в эксперименте при регистрации интенсивности нейтронных сигналов.

Интенсивность сформированных импульсных сигналов, также по отдельности для каждого нейтронного счетчика, регистрируется посредством цифровых пересчетных схем, которые монтируются на многоканальной плате, управляемой компьютером по интерфейсу USB. В конечном итоге число нейтронных сигналов, поступивших от каждого счетчика в течение заданного интервала времени, передается по линии USB в компьютер и сохраняется на его диске для дальнейшей обработки.

На рис. 4 приведена принципиальная схема предварительного усилителя, который устанавливается рядом со счетчиком и обеспечивает подвод высоковольтного питания к его анодной нити (катодом служит заземленный металлический корпус счетчика), съем с анодного вывода счетчика импульсных сигналов и усиление этих сигналов до величины, приемлемой для их передачи по кабельным линиям связи.

Высокое напряжение питания обеспечивается единым источником для всех счетчиков нейтронного детектора и выбирается таким образом, чтобы счетчики одновременно оказывались в середине плато своей счетной характеристики. Для фильтрации высокочастотных помех, которые могут наводиться на линиях подведения питания, высокое напряжение к анодному выводу счетчика подключается через находящийся на плате RC-фильтр.

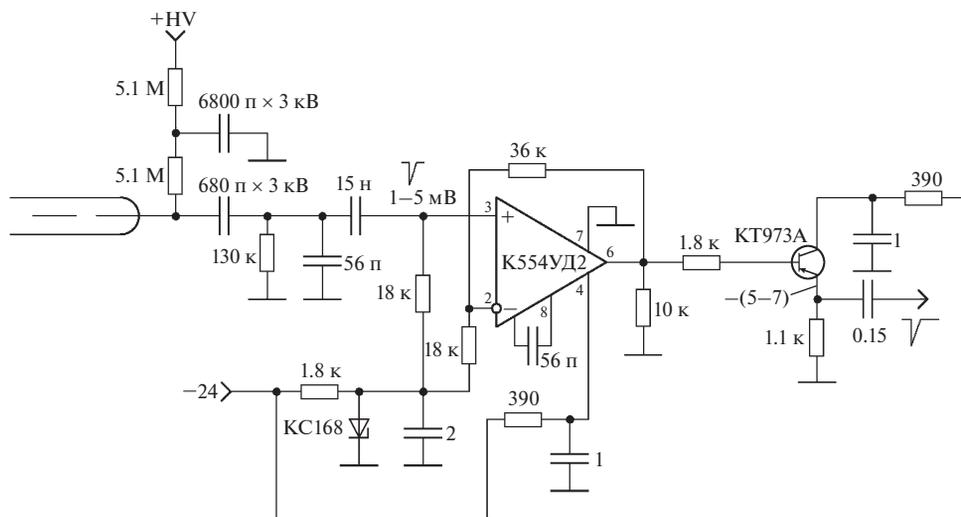


Рис. 4. Принципиальная схема предварительного усилителя нейтронных сигналов.

После предварительного усиления импульсные сигналы от нейтронных счетчиков по экранированным кабелям передаются на амплитудные дискриминаторы, построенные на операционном усилителе К544УД2 и компараторе К597СА3 [3]. Конкретная величина порога выбирается на основе практического опыта индивидуально для каждого счетчика, обеспечивая стабильный счет нейтронных импульсов и нечувствительность канала к внешним электромагнитным помехам.

3. РЕГИСТРАЦИЯ ИНТЕНСИВНОСТИ СИГНАЛОВ ОТ ПРОПОРЦИОНАЛЬНЫХ НЕЙТРОННЫХ СЧЕТЧИКОВ

Сформированные на плате дискриминаторов выходные импульсы передаются на плату пересчетных схем, которая служит для подсчета количества импульсов, поступивших в течение определенного времени от каждого из счетчиков детектора.

Пересчетная плата построена на базе большой интегральной микросхемы программируемой логики (п.л.и.с.) ЕРМ3256АТС144 от фирмы Altera [4]. Внутренняя программа микросхемы п.л.и.с. позволяет обслуживать параллельно до 27 отдельных информационных каналов, сигналы которых подключаются к входам IN0–IN26, и подсчитывает для каждого из них количество входных импульсов, поступивших на протяжении фиксированного временного интервала. Внутренняя программа, обеспечивающая управление микросхемой п.л.и.с. для реализации ее работы, написана на языке VERILOG, а ее принципиальная структура иллюстрируется схемой на рис. 5. Блок пересчетных схем, реализованных внутри п.л.и.с., состоит из 27 эле-

ментарных ячеек Counter7bit, каждая из которых реализует простую 7-разрядную двоичную пересчетную схему.

Соответствующий сосчитанному количеству импульсов двоичный код для каждого канала периодически выставляется на выходах 8-разрядной цифровой магистрали Q0–Q7, подключенной к интерфейсному модулю MMusb245RL [5], обеспечивающему передачу накопленной пересчетными схемами информации в управляющий компьютер по интерфейсу USB. Периодичность выдачи текущего числа входных сигналов для каждого информационного канала составляет 160 мкс. Подсчет количества импульсов, поступивших на протяжении временных промежутков большей (произвольной) длительности, производится путем суммирования полученных от пересчетной платы чисел, которое выполняется управляющей программой внешнего компьютера.

Чтобы уменьшить количество логических вентилей п.л.и.с., приходящихся на один информационный канал, пересчетные ячейки построены по максимально упрощенной схеме; в частности, в них не предусмотрен сброс в ноль содержимого по истечении элементарного временного интервала измерений. Поэтому непосредственный подсчет входных сигналов внутри п.л.и.с. всегда происходит с периодическим переполнением пересчетных схем, а правильное количество импульсов, зарегистрированных в каждом информационном канале на протяжении завершившегося временного интервала, рассчитывается программным путем уже после передачи данных из пересчетной ячейки управляющей программе внешнего компьютера.

Интерфейсный модуль MMusb245RL, с помощью которого проходит информационный обмен между платой пересчетных схем и работающей на

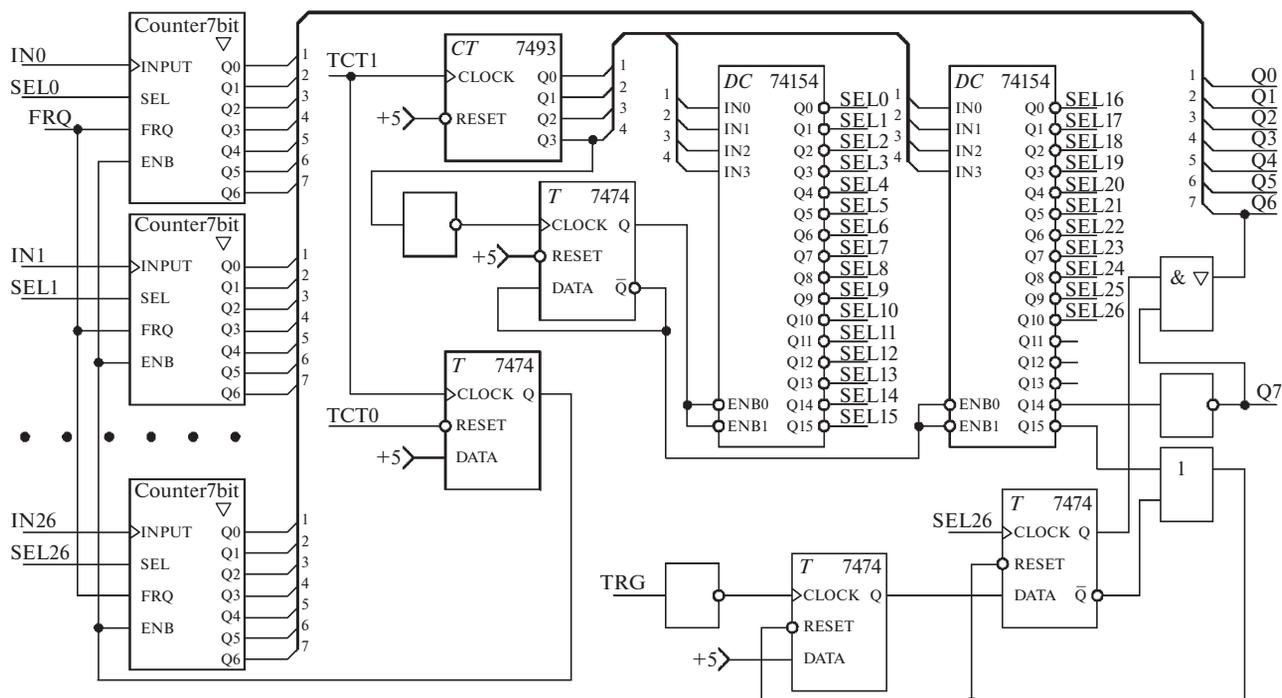


Рис. 5. Эквивалентная принципиальная схема программы управления микросхемой п.л.и.с.

внешнем компьютере управляющей программой, построен на базе интегральной микросхемы FT245R [6], поддержка которой осуществляется через посредство стандартных программ-драйверов, разработанных для основных применяемых в настоящее время операционных систем (как Windows, так и Linux). Это обстоятельство позволяет разрабатывать взаимодействующую с информационными каналами пересчетной платы программу управления измерениями на языках высокого уровня общего назначения, используя исключительно стандартные программные вызовы

операционной системы и не прибегая к каким-либо специфическим средствам для взаимодействия с аппаратурой интерфейса.

4. КАЛИБРОВКА ДЕТЕКТОРА НЕЙТРОНОВ И ПРОЦЕДУРА ИЗМЕРЕНИЙ

Для калибровки нейтронного детектора использовался источник нейтронов ^{252}Cf с активностью $3 \cdot 10^4$ нейтронов/с в телесный угол 4π , который помещался на место мишени. Источник ^{252}Cf был выбран, поскольку энергетический спектр ней-

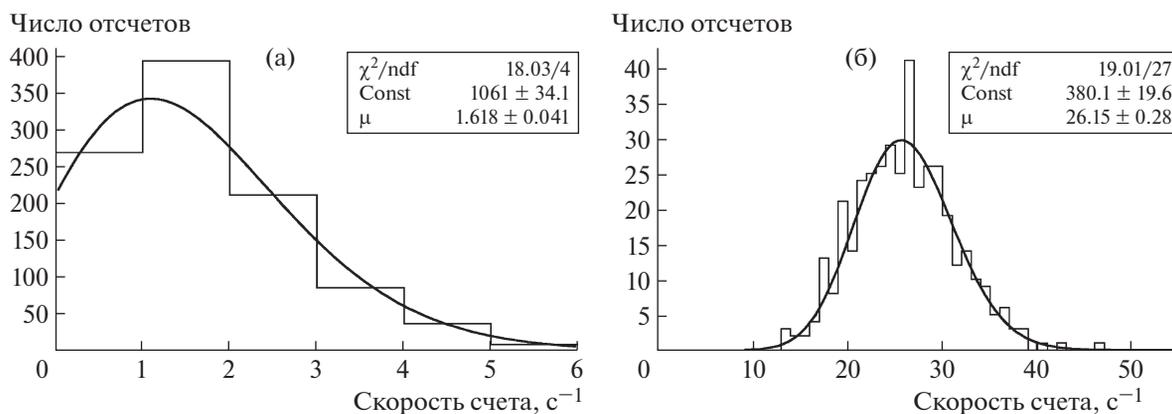


Рис. 6. Распределения скорости счета группы из 12 ^3He -счетчиков по множественности: а – при выключенном пучке (фон), б – при включенном пучке ионов D^+ с энергией 25 кэВ и токе 35 мкА на мишени из CVD-алмаза (эффект).

тронов (наиболее вероятная энергия – 2.2 МэВ) от него близок к первичной энергии нейтронов 2.45 МэВ от исследуемой DD-реакции (2). Эффективность регистрации нейтронов от источника определялась для каждой из трех групп счетчиков (см. рис. 1). Для высокоэффективной регистрации первичных нейтронов от реакции (2) с энергией 2.45 МэВ счетчики СНМ18 дополнялись замедлителем нейтронов – для снижения их энергии до тепловой. Был использован комбинированный замедлитель из органического стекла (толщиной 3 см) и парафина (толщина 5 см).

Перед началом измерений определялся средний фон для каждой группы счетчиков при выключенном пучке. Затем также для каждой группы счетчиков измерялся средний счет при включенном пучке (см. рис. 6).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Описанная многоканальная система на основе 36 пропорциональных нейтронных счетчиков СНМ18 обладает высокой чувствительностью к нейтронам и позволила покрыть все интересные направления их вылета из мишени. Это позволяет исследовать как интегральные, так и угловые зависимости выхода нейтронов из мишени. Расположение счетчиков по всем направлениям вокруг исследуемой мишени позволило провести ряд экспериментов по исследованию угловых зависимостей выходов DD-реакций в дейтерированных кристаллических структурах при энергиях дейтронов 10–25 кэВ, а также по стимулированию DD-реакции пучками ионов [7–13]. В частности, получены результаты по анизотропии выхода нейтронов в мишенях текстурированного CVD-алмаза, насыщенного дейтерием [12].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Негодаев М.А., Багуля А.В.* Препринт ФИАН. М., 1996. № 11.
2. Geant4 Collaboration. Geant4 – a simulation toolkit // Nucl. Instrum. and Methods A. 2003. V. 506 (3). P. 250. [https://doi.org/10.1016/S0168-9002\(03\)01368-8](https://doi.org/10.1016/S0168-9002(03)01368-8)
3. Все отечественные микросхемы: Справочник / Под ред. А.В. Перебаскина. М.: Додэка-XXI, 2004.
4. Altera. Data Sheet: MAX 3000A Programmable Logic Device Family – Altera. 2006. <https://www.altera.com/literature/ds/m3000a.pdf>
5. PROPOX. MMusb245RL User's manual. 2015. <http://propox.com/>
6. Future Technology Devices International Ltd. FT245R USB FIFO IC datasheet. 2015. <http://www.ftdichip.com/Products/>
7. *Багуля А.В., Далькаров О.Д., Негодаев М.А., Русецкий А.С., Чубенко А.П.* // Краткие сообщения по физике ФИАН. 2012. № 9. С. 3.
8. *Багуля А.В., Далькаров О.Д., Негодаев М.А., Русецкий А.С., Чубенко А.П.* // Краткие сообщения по физике ФИАН. 2012. № 12. С. 3.
9. *Багуля А.В., Далькаров О.Д., Негодаев М.А., Русецкий А.С., Чубенко А.П., Щенетов А.Л.* // Краткие сообщения по физике ФИАН. 2013. № 10. С. 15.
10. *Багуля А.В., Далькаров О.Д., Негодаев М.А., Русецкий А.С., Чубенко А.П., Щенетов А.Л.* // Краткие сообщения по физике ФИАН. 2013. № 11. С. 3.
11. *Bagulya A.V., Dalkarov O.D., Negodaev M.A., Rusetskii A.S., Chubenko A.P.* // Physica Scripta. 2015. V. 90. № 7. P. 074051. <https://doi.org/10.1088/0031-8949/90/7/074051>
12. *Bagulya A.V., Dalkarov O.D., Negodaev M.A., Rusetskii A.S., Chubenko A.P., Ralchenko V.G., Bolshakov A.P.* // Nucl. Instrum. Methods B. 2015. V. 355. P. 340. <https://doi.org/10.1016/j.nimb.2015.01.021>
13. *Багуля А.В., Далькаров О.Д., Негодаев М.А., Русецкий А.С., Цехош В.И., Болотоков А.А.* // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. 2017. № 2. С. 16. <https://doi.org/10.7868/S020735281701005X>