

УДК 533.9.08

Нейтронный LiH-аттенюатор для гамма-спектрометра ИТЭР

Н. С. Нерсисян, А. Е. Шевелев, И. Н. Чугунов, Е. М. Хилькевич, Д. Б. Гин,
И. А. Полуновский, Д. Н. Дойников, В. О. Найденев, И. В. Городков

В ФТИ им. А. Ф. Иоффе и АО «Техноэксан» был разработан макет аттенюатора для диагностической системы ИТЭР. Аттенюатор предназначен для ослабления фона, вызванного попаданием нейтронного излучения в гамма-спектрометр. Аттенюатор представляет собой стальной корпус цилиндрической формы 400 мм длиной, заполненный таблетками прессованного порошка гидрида лития с природным соотношением изотопов лития. Корпус герметично заварен с двух концов. В статье представлены результаты исследований характеристик макетного варианта нейтронного LiH-аттенюатора, изготовленного на Новосибирском заводе химконцентратов. Коэффициент аттенюации нейтронного излучения $^{241}\text{Am-Be}$ источника для энергетического диапазона выше 5 МэВ составил 90,8, что хорошо согласуется с данными моделирования по методу Монте-Карло.

PACS: 52.70.La

Ключевые слова: физика плазмы; диагностика высокотемпературной плазмы; гамма-спектрометрия; защита от нейтронного излучения; гидрид лития.

Введение

В Физико-техническом институте им. А. Ф. Иоффе разрабатываются гамма-спектрометрические системы для диагностики плазмы на токамаках, в том числе и для международного реактора ИТЭР, строящегося в настоящее время на территории Франции [1—4]. Гамма-спектрометрическая диагностика термоядерной плазмы основана на регистрации и последующем анализе гамма-излучения, рождающегося в результате гамма-переходов в ядрах, возбуждаемых ядерными реакциями, про-

ходящими в плазме токамака [5]. Для измерения гамма-спектров используются высокоэффективные детекторы, наблюдающие плазму через коллиматор, ограничивающий исследуемый объем камеры токамака и защищающий детектор от рассеянного излучения. Основным источником фона для гамма-диагностики — это термоядерные нейтроны: в дейтериевой (DD) плазме нейтроны имеют среднюю энергию 2,45 МэВ; в дейтерий-третиевой (DT) плазме — 14 МэВ. Для ослабления фона, вызванного попаданием в детектор нейтронного излучения, было предложено устанавливать в канале коллиматора специальный фильтр — нейтронный аттенюатор (ослабитель). Для ослабления потока нейтронов через коллиматор, как правило, используют водородосодержащие материалы, например полиэтилен. Однако присутствие углерода в аттенюаторе гамма-диагностической системы на токамаке нежелательно из-за неупругого рассеяния быстрых нейтронов на ядрах ^{12}C , ведущего к появлению фонового гамма-излучения с энергией кванта 4,44 МэВ, величина которого совпадает с гамма-линией, используемой для диагностики быстрых альфа-частиц в плазме.

Одним из наилучших материалов, обеспечивающих высокое отношение коэффициентов аттенюации нейтронного и гамма-излучения, является гидрид лития LiH. Гидрид лития — это кристаллическое вещество с температурой плавления 692 °С

Нерсисян Нарек Саакович, лаборант¹.
 Шевелев Александр Евгеньевич, научный сотрудник¹.
 Чугунов Игорь Николаевич, ведущий научный сотрудник¹.
 Хилькевич Евгений Михайлович, научный сотрудник¹.
 Гин Дмитрий Борисович, научный сотрудник¹.
 Полуновский Игорь Александрович, научный сотрудник¹.
 Дойников Дмитрий Николаевич, старший научный сотрудник¹.
 Найденев Виктор Олегович, зав. циклотронной лабораторией¹.
 Городков Игорь Васильевич, технический директор².
¹ Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе РАН.
 Россия, 194021, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 26.
 E-mail: Narek.Nersisyan.92@mail.ru
² АО «Техноэксан».
 Россия, 194021, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 26.
 Тел. 8 (962) 688-98-59.

Статья поступила в редакцию 13 апреля 2016 г.

© Нерсисян Н. С., Шевелев А. Е., Чугунов И. Н., Хилькевич Е. М., Гин Д. Б., Полуновский И. А., Дойников Д. Н., Найденев В. О., Городков И. В., 2016

(в инертной атмосфере) и плотностью $0,78 \text{ г/см}^3$ [6]. LiH относительно устойчив в сухом воздухе, но быстро гидролизуется парами воды. Он реагирует с водой, выделяя водород (1 кг LiH выделяет $2,82 \text{ м}^3 \text{ H}_2$).

В 90-е годы в ФТИ им. А. Ф. Иоффе был разработан прототип ^6LiH нейтронного attenuатора [7], который представляет собой герметичную алюминиевую капсулу цилиндрической формы (с размерами $\varnothing 30 \times 300 \text{ мм}$ и с толщиной стенки 1 мм), вставляемую в коллиматор. Капсула была наполнена таблетками прессованного порошка гидрида лития LiH, обогащенного изотопом ^6Li до 92 %. Прототип attenuатора был успешно испытан в экспериментах с использованием нейтронного генератора. Ослабление фильтром потока нейтронов от нейтронного генератора были измерены в режимах с выходом DD- и DT-нейтронов.

В данной работе был разработан и испытан макет attenuатора для диагностической системы ИТЭР, причем для проведения измерений был использован сцинтилляционный нейтронный спектрометр на основе стильбена, в котором использована система дискриминации формы импульса с регулируемым порогом. Пороги регистрации протонов отдачи устанавливались равными $\sim 10 \text{ МэВ}$ для DT- и $\sim 2 \text{ МэВ}$ для DD-нейтронов. Измеренные коэффициенты ослабления для нейтронов 2,8 и 14,8 МэВ составили 900 и 30 соответственно.

Впервые ^6LiH нейтронный attenuатор с размерами $\varnothing 30 \times 300 \text{ мм}$ был использован в плазменных экспериментах на токамаке JT-60U (Япония) во время экспериментов с NBI нагревом плазмы дейтерием [8]. Гамма-измерения показали, что использование этого attenuатора привело уменьшению фона, вызванного нейтронами, в 10 раз. Один модуль ^6LiH нейтронного attenuатора был установлен в коллиматорной системе гамма-спектрометра токамака JET (ЕС, Великобритания). Измерения гамма-излучения, проведенные на JET, продемонстрировали эффективность ^6LiH нейтронного attenuатора в экспериментах с DD плазмой [9, 10]. В этих экспериментах применение attenuатора уменьшило фоновую загрузку детектора, вызванную неупругим рассеянием нейтронов в материале детектора, примерно в 100 раз. В то же время использование attenuатора уменьшило прохождение гамма-излучения из плазмы всего, примерно, в 2 раза.

Разработка нейтронного attenuатора для гамма-спектрометра ИТЭР

В рамках проектирования системы анализатора атомов перезарядки (НРА) для токамака ИТЭР было предложено установить гамма-спектрометр в

нейтронную ловушку, расположенную позади анализаторов. Задачей спектрометра является линейно интегрированное измерение гамма- и жесткого рентгеновского излучения из плазмы токамака.

Гамма-спектрометрические измерения предоставляют данные об отношении компонент термоядерного топлива в плазме nT/nD , энергетическом распределении альфа-частиц, рожденных в термоядерной реакции $T(d,n)^4\text{He}$, ионной температуре плазмы, а также энергетическом распределении ускоренных электронов. Спектрометр включает в себя два детектора: полупроводниковый HPGe (High Purity Germanium) и сцинтилляционный детектор на основе кристалла бромида лантана $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ [11] с размерами $\varnothing 76,2 \times 76,2 \text{ мм}$. HPGe-детектор N -типа обладает уникальным энергетическим разрешением [12], а именно, около 2,5 кэВ на линии ^{60}Co 1,33 МэВ, что позволяет анализировать уширенные эффектом Доплера линии гамма-излучения в зарегистрированных спектрах [13]. Высокоточные измерения доплеровских форм линий гамма-переходов могут предоставить информацию о функции распределения быстрых ионов в плазме.

Предложено использовать в системе гамма-спектрометра HPGe детектор N -типа производства компании CANBERRA, оборудованный электрически охлаждаемым криостатом Cryo-Pulse 5 Plus [14]. Серийный детектор производства компании Saint-Gobain, использующий сцинтилляционный кристалл $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ с коротким временем высвечивания, может обеспечить спектрометрические измерения при скорости счета до нескольких МГц.

Схема расположения элементов гамма-спектрометра внутри нейтронной ловушки показана на рис. 1.

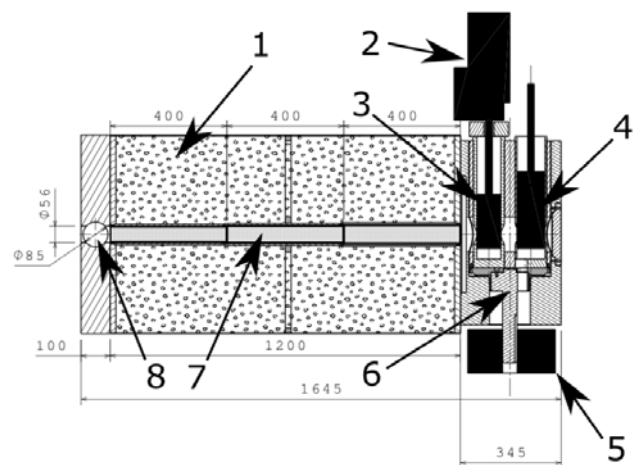


Рис. 1. Схема компонентов гамма-спектрометра, расположенного внутри нейтронной ловушки: 1 — бетон, 2 — кулер, 3 — HPGe, 4 — $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$, 5 — электродвигатель, 6 — поворотная камера, 7 — LiH-аттенюаторы, 8 — нейтронный спектрометр.

Было предложено ориентировать оси детекторов перпендикулярно к оси канала НРА и установить их внутри вращающейся камеры, что позволит менять местами положение детекторов в зависимости от экспериментальных условий. Камера снабжена электромотором, который будет иметь возможность поворачивать камеру на 180° между разрядами ИТЭР. Для защиты гамма-детекторов от нейтронного излучения и сохранения параметров нейтронной ловушки было предложено установить в стальной коллиматор внутри нейтронной ловушки модули нейтронных аттенуаторов.

В ФТИ им. А. Ф. Иоффе и АО «Техноэксан» был разработан макет аттенуатора для диагностической системы ИТЭР на основе применения гидрида лития LiH. Макетный вариант аттенуатора был изготовлен на Новосибирском заводе химконцентратов, входящем в структуру Топливной компании «ТВЭЛ» Госкорпорации «Росатом». Макет аттенуатора представляет собой стальной корпус цилиндрической формы, наполненный таблетками прессованного порошка гидрида лития, фотография одной таблетки представлена на рис. 2. Корпус герметично заварен с двух концов методом лазерной сварки в среде гелия.

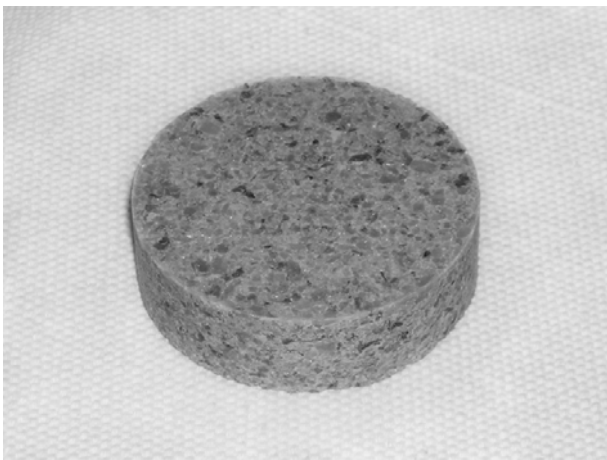


Рис. 2. Фотография одной таблетки, изготовленная методом прессования порошка гидрида лития.

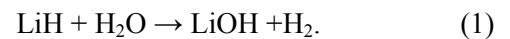
Изготовленный аттенуатор имеет следующие параметры:

- длина корпуса аттенуатора составила 400 мм;
- внешний диаметр — 67 мм;
- внутренний диаметр — 60 мм;
- Полная высота столба таблеток — 398,2 мм.
- Средняя плотность гидрида лития в таблетках $0,715 \text{ г/см}^3$.

В макете использован гидрид лития с природным отношением концентраций изотопов лития 6 и 7: 7,5 % — ^6Li и 92,5 % — ^7Li . Выбор в пользу

использования природного лития в соединении был сделан на основе данных нейтронных расчетов, проведенных для полной длины аттенуатора 120 см, которые показали незначительное увеличение аттенуации гидрида лития, обогащенного изотопом ^6Li . При этом стоимость такого фильтра значительно превосходит аттенуатор с природным соотношением изотопов лития.

Стальной герметичный корпус предохраняет гидрид лития от взаимодействия с парами воды, которое приводит к выделению водорода и образования гидроксида лития в ходе химической реакции:



Герметичный корпус предотвращает выход трития, нарабатанного в аттенуаторе при взаимодействии с быстрыми нейтронами в ядерных реакциях $^6\text{Li}(n,t)^4\text{He}$ и $^7\text{Li}(n,tn)^4\text{He}$. Сталь была выбрана в качестве материала корпуса для придания устройству дополнительной прочности на случай пожара в портовой ячейке экваториального порта ИТЭР, где планируется разместить гамма-спектрометр. Для контроля герметичности сварных соединений был реализован способ вакуумной камеры, соответствующий методу В.6 европейского стандарта EN 13185:2001. Натекание при помещенном в камеру макете нейтронного аттенуатора составило $0,2 \times 10^{-10} \text{ м}^3 \text{ Па с}^{-1}$, что свидетельствует о высоком качестве сварных соединений и герметичности корпуса макета нейтронного аттенуатора.

Изучение характеристик макета нейтронного аттенуатора

В ФТИ им. А. Ф. Иоффе проведено изучение характеристик разработанного макета нейтронного аттенуатора. Для этого методом Монте-Карло были проведены расчеты коэффициентов ослабления гамма-излучения нейтронным аттенуатором в энергетическом диапазоне 0,5—18 МэВ. Были рассчитаны спектры излучения, регистрируемые детектором с нейтронным аттенуатором, установленным между источником излучения и детектором, а также без него. Результаты расчетов приведены на рис. 3 черными квадратными точками.

Расчеты были проверены в экспериментальных измерениях поглощения аттенуатором гамма-излучения от радиоактивных источников ^{60}Co , ^{137}Cs и $^{241}\text{Am-Be}$. При регистрации спектров использовался гамма-спектрометр с кристаллом $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ $\varnothing 76 \times 76$ мм. Детектор был установлен на расстоянии примерно 50 см от источника излучения. При измерении поглощения излучения веществом фильтра между детектором и источником

излучения устанавливался исследуемый макет нейтронного attenuатора. Фотография измерительной установки, использованная для измерения коэффициента attenuation гамма-излучения, показана на рис. 4.

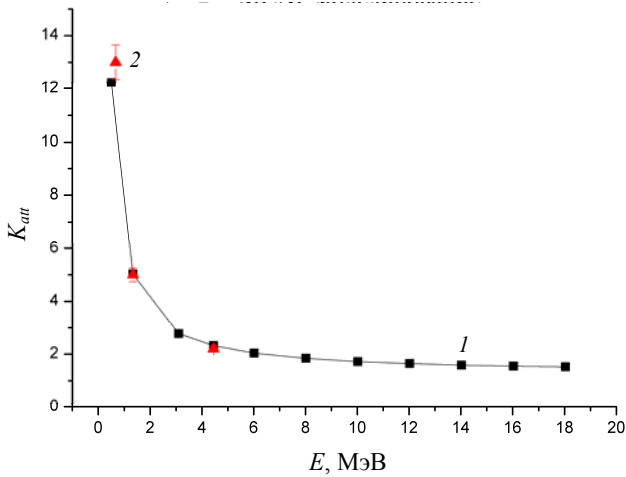


Рис. 3. График зависимости коэффициента attenuation K_{att} от энергии E квантов из гамма-источников. Кривая 1 — расчетное MCNP-моделирование; кривая 2 — аппроксимация измеренных экспериментальных данных, представленных в виде красных треугольников.



Рис. 4. Фото измерительной установки для измерения коэффициента attenuation гамма-излучения макетом LiH attenuатора.

Для каждого источника излучения сначала набиралась экспозиция с attenuатором, а затем без него. Коэффициент attenuation вычислялся как отношение числа событий в ППП без attenuатора к ППП с attenuатором. Из измеренных спектров перед расчётами вычитался фоновый спектр. Формула для расчета имела вид:

$$K_{att} = \frac{S_0}{S_{LiH}}, \quad (2)$$

где S_0 — сумма событий, зарегистрированных детектором в пике полного поглощения от источника ионизирующего излучения в измерениях без attenuатора; S_{LiH} — сумма событий в ППП в измерениях с attenuатором. Из полученных экспериментальных данных были рассчитаны коэффициенты attenuation гамма-источников для энергий излучения 0,662, 1,33 и 4,44 МэВ, которые

приведены на рис. 3 красными треугольными точками.

При изучении защитных свойств attenuатора были проведены расчеты коэффициентов ослабления нейтронного излучения нейтронным attenuатором в диапазоне 0,5—14,1 МэВ с помощью программы MCNP. Были рассчитаны спектры излучения, регистрируемые детектором, с нейтронным attenuатором и без него. Коэффициент attenuation рассчитывался как отношение интегралов спектра от 0,1 МэВ до энергии моноэнергетичного источника нейтронов для случаев с применением нейтронного attenuатора и без него. Рассчитанные коэффициенты ослабления нейтронного излучения K_n приведены на рис. 5.

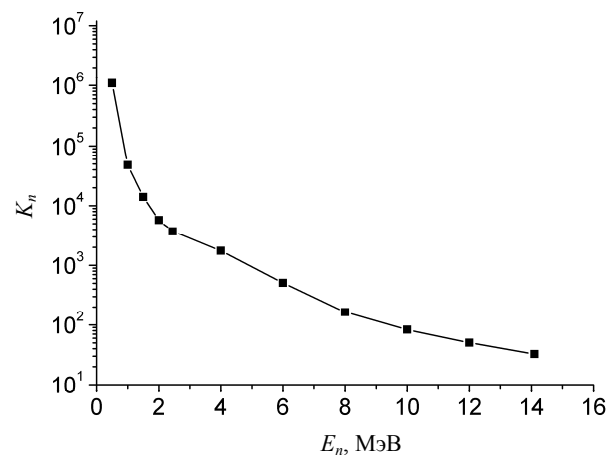


Рис. 5. График зависимости коэффициента attenuation K_n быстрых нейтронов от энергии нейтронов E_n .

Для проверки расчетов были проведены измерения спектров нейтронного излучения с использованием макета нейтронного attenuатора и без него. Для оценки коэффициента attenuation быстрых нейтронов использовался нейтронный спектрометр с кристаллом стибьена $\varnothing 30 \times 11$ мм, который регистрировал нейтронное излучение от $^{241}\text{Am-Be}$ источника.

Кристалл стибьена является одним из лучших органических сцинтилляторов, обеспечивающих разделение сигналов от нейтронного и гамма-излучений по форме импульса [15—17]. В области энергий термоядерных нейтронов степень подавления гамма-излучения может быть достигнута 10^3 раз и выше. В ФТИ им. А. Ф. Иоффе была написана компьютерная программа для проведения n/γ разделения импульсов в оцифрованном сигнале детектора и построения нейтронных и гамма-спектров.

Для записи сигнала нейтронного детектора использовалось устройство цифрового ввода сигнала, на которое подается сигнал детектора после предусилителя, на основе базового модуля

АМВРЕХ5 производства ЗАО «Инструментальные системы» с использованием submodule 14-разрядного АЦП ADM214x400M, позволяющего оцифровывать сигнал с частотой дискретизации до 500 МГц. Технические характеристики устройства цифрового ввода АМВРЕХ5/ADM214x400M:

- Число каналов АЦП — 2;
- Разрядность АЦП — 14 бит;
- Максимальная частота дискретизации — 500 МГц;
- Объем встроенной памяти — 2 Гб;
- Системная магистраль PCI-Express — x8.

Нейтронным спектрометром на основе кристалла стиблена был записан сигнал при регистрации нейтронного излучения $^{241}\text{Am-Be}$ источника. Запись сигнала производилась в так называемой «сегментной моде», когда на жесткий диск ПК записываются только импульсы детектора с временной привязкой без промежутков между детектируемыми событиями. На рис. 6 представлены импульсы детектора при регистрации нейтрона (кривая 1) и гамма-кванта (кривая 2).

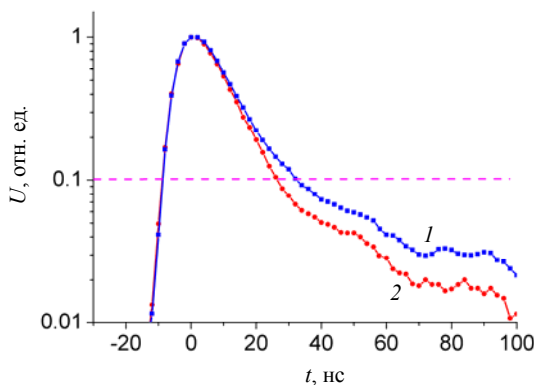


Рис. 6. Нормированные осциллограммы сигналов U от нейтронного (кривая 1) и гамма- (кривая 2) излучений.

Из полученного нейтронного и гамма-сигналов видно, что сигналы отличаются по продолжительности высвечивания на несколько нс (4—6 нс на 0,1 полной высоты импульса). С помощью разработанной программы была проведена обработка измеренного сигнала и построены нейтронные спектры с attenuатором и без, представленные на рис. 7.

Коэффициент attenuation нейтронного излучения источника $^{241}\text{Am-Be}$ для энергетического диапазона выше 5 МэВ, рассчитанный программой MCNP, составил $108,0 \pm 24,4$, а коэффициент attenuation, полученный из эксперимента, составил $90,8 \pm 17,7$. Расхождение между расчетными и экспериментальными результатами может быть объяснено регистрацией детектором нейтронов, рассеянных в материалах, окружающих детектор.

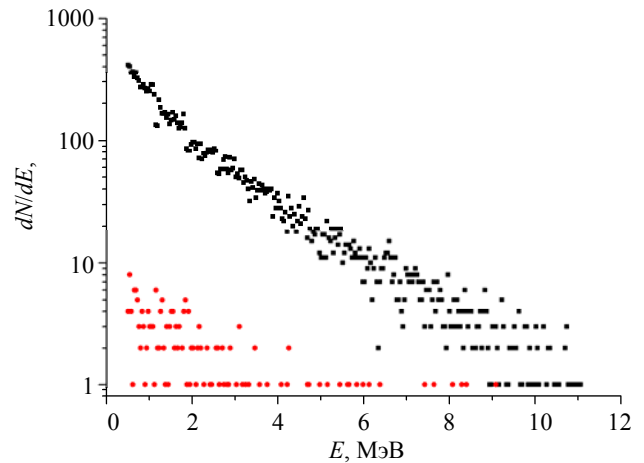


Рис. 7. Нейтронный спектр (число отсчетов на канал) в измерениях без attenuатора (черные точки) и с attenuатором (красные точки).

Во время подготовки к защите «Предварительного проекта Гамма-спектрометра в составе системы NRA токамака ИТЭР» [4] были проведены расчеты распределений нейтронов и гамма-излучения в материале ловушки с нейтронным attenuатором, состоящем из трех модулей, аналогичных исследуемому макету, с общей длиной 120 см. Расчеты показали, что при входящем в нейтронную ловушку нейтронном потоке 3×10^9 н/(см²с) поток на первый детектор будет равен $3,8 \times 10^4$ н/(см²с), а величина фонового потока гамма-квантов, примерно, $5,5 \times 10^4$ γ/(см²с).

Заключение

Проведены исследования характеристик нейтронного LiH-attenuатора, разработанного для гамма-спектрометра системы анализаторов атомов перезарядки ИТЭР. Измеренные коэффициенты ослабления нейтронным attenuатором нейтронного и гамма-излучения хорошо согласуются с данными моделирования по методу Монте-Карло. Проведенные исследования показали, что радиационная защита гамма-спектрометра, неотъемлемой частью которой является система нейтронных attenuаторов на основе гидрида лития, способна справиться с высокими потоками нейтронного излучения в условиях экспериментов с термоядерной плазмой ИТЭР и обеспечить качественные измерения гамма-излучения.

А. Е. Шевелев, И. Н. Чугунов, Е. М. Хилькевич и Д. Б. Гин благодарят за поддержку из средств Государственного контракта РФ № Н.4к.52.9Б.14.1002.

Авторы благодарят В. Г. Киптилого, Калэмский научный центр, г. Абингдон, Великобритания (CCFE, Culham Science Centre, Abingdon, Oxon, XI4 3DB, UK), за помощь в проведении MCNP расчетов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Chugunov I. N., et al. // Nucl. Fus. 2011. Vol. 51. P. 083010.
2. Chugunov I. N., Kiptily V. G., Shevelev A. E., Gin D. B. // Fusion Sci. Technol. 2011. Vol. 59. P. 176.
3. Shevelev A. E., et al. // Nucl. Fus. 2013. Vol. 53. P. 123004.
4. Gin D., et al. // AIP Conference Proceedings. 2014. Vol. 1612. P. 149.
5. Kiptily V. G., Cecil F. E., Medley S. S. // Plasma Phys. Control. Fusion. 2006. Vol. 48. P. R59.
6. Химическая энциклопедия. — М.: Советская энциклопедия, 1990.
7. Kiptily V. G., Livke A. V., Nagorny V. I., Nefedov Yu. Ya., Savin M. V., Semenov V. I., Chirkin V. A. // Tech. Phys. Vol. 68. No. 4. P. 136 (1998)
8. T. Kondoh, et al. / 1998 ICPP & 25th European Conf. Controlled Fusion and Plasma Physics (Praha, 1998) (ECA). Vol. 22C. P. 1478.
9. Chugunov I. N., Shevelev A. E., Gin D. B., Naidyonov V. O., Kiptily V., Edlington T., Syme B. // PTE. 2008. Vol. 2. P. 12.
10. Murari A., et al. // Nucl. Instrum. and Meth. Phys. Res. 2008. Vol. A 593. P. 492.
11. Nocente M., et al. // Review of Scientific Instruments. 2010. Vol. 81. P. 10D321.
12. Pehl R. H., et al. // Nuclear Science, IEEE Transactions. 1979. Vol. 26. No. 1. P. 321.
13. Kiptily V. G. // Fusion Technology, 1990. Vol. 18. P. 583.
14. Cryo-Pulse 5 plus Electrically Refrigerated Cryostat. http://www.canberra.com/products/detectors/pdf/CryoPulse_5_plus_C39805.pdf
15. Kiptily V. G., et al. / Diagnostic for Experimental Thermonuclear Fusion Reactors, Varena (1995), — Plenum Press, NY, USA.
16. Kiptily V. G., et al. / Advanced Diagnostics for Magnetic and Inertial Fusion, Varena (2001). — Kluwer Academic/Plenum Publishers, NY, USA. P. 141—144.
17. Kolevator Yu. I., Semenov V. P., Trykov L. A. Spectrometry of neutrons and gamma of emanation in radiation physics. — М.: Energoatomizdat, 1990.

Neutron LiH attenuator for the gamma-ray spectrometer of ITER

N. S. Nersesyan¹, A. E. Shevelev¹, I. N. Chugunov¹, E. M. Khilkevitch¹, D. B. Gin¹, I. A. Polunovskiy¹, D. N. Doinikov¹, V. O. Naidenov¹, and I. V. Gorodkov²

¹Ioffe Institute of Physics and Technology
26 Politekhnikeskaya str., St Petersburg, 194021, Russia
E-mail: Narek.Nersesyan.92@mail.ru

²JSC Technoexan
26 Politekhnikeskaya str., St Petersburg, 194021, Russia

Received April 13, 2016

A mock-up of neutron attenuator has been designed at the Ioffe Institute and JSC "Technoexan" in the framework of ITER diagnostic system development. The attenuator is intended for suppression of radiation background caused by neutron flux in a gamma-ray spectrometer. The attenuator is a steel cylindrical casing of 400 mm in length, filled with pellets of pressed lithium hydride powder with natural ratio of lithium isotopes. The housing is hermetically welded at both ends. The article presents the results of studies of characteristics of mock-up version LiH neutron attenuator manufactured at the Novosibirsk Chemical Concentrates Plant. Measured attenuation factor for neutron radiation from ²⁴¹Am-Be source for the energy range above 5 MeV was 90.8, which is in good agreement with Monte Carlo simulation data.

PACS: 52.70.La

Keywords: physics of plasma; diagnostics of high-temperature plasma; gamma-ray spectrometry; neutron radiation shielding; lithium hydride.

REFERENCES

1. I. N. Chugunov, et al., Nucl. Fus. **51**, 083010 (2011).
2. I. N. Chugunov, V. G. Kiptily, A. E. Shevelev, and D. B. Gin, Fusion Sci. Technol. Vol. **59**, 176 (2011).
3. A. E. Shevelev, et al., Nucl. Fus. **53**, 123004 (2013).
4. D. Gin, et al., AIP Conference Proceedings **1612**, 149 (2014).
5. V. G. Kiptily, F. E. Cecil, and S. S. Medley, Plasma Phys. Control. Fusion **48**, R59 (2006).
6. *Chemical encyclopedia*. Ed. by I. L. Knunyants (Moscow, Soviet encyclopedia, 1990) [in Russian].
7. V. G. Kiptily, A. V. Livke, V. I. Nagorny, Yu. Ya. Nefedov, M. V. Savin, V. I. Semenov, and V. A. Chirkin, Tech. Phys. **68** (4), 136 (1998).
8. T. Kondoh, et al., in *Proc. 1998 ICPP & 25th European Conf. Controlled Fusion and Plasma Physics* (Prague, 1998) (ECA). **22C**, 1478.
9. I. N. Chugunov, A. E. Shevelev, D. B. Gin, V. O. Naidyonov, V. Kiptily, T. Edlington, and B. Syme, PTE **2**, 12 (2008).
10. Murari A., et al., Nucl. Instrum. and Meth. Phys. Res. **A 593**, 492 (2008).
11. Nocente M., et al., Review of Scientific Instruments **81**, 10D321 (2010).
12. R. H. Pehl, et al., Nuclear Science, IEEE Transactions **26** (1), 321 (1979).
13. V. G. Kiptily, Fusion Technology **18**, 583 (1990).
14. *Cryo-Pulse 5 plus Electrically Refrigerated Cryostat*. http://www.canberra.com/products/detectors/pdf/Cryo-Pulse_5_plus_C39805.pdf
15. V. G. Kiptily, et al., in *Proc. Diagnostic for Experimental Thermonuclear Fusion Reactors, Varena, 1995* (Plenum Press, NY, USA). P. 463.
16. V. G. Kiptily, et al., in *Proc. Advanced Diagnostics for Magnetic and Inertial Fusion, Varena, 2001* (Kluwer Academic/Plenum Publishers, NY, USA). P. 141.
17. Yu. I. Kolevatov, V. P. Semenov, and L. A. Trykov, *Spectrometry of Neutrons and Gamma of Emanation in Radiation Physics*. (Moscow, Energoatomizdat, 1990) [in Russian].