

ДОЗИМЕТР НЕЙТРОНОВ С ЭНЕРГИЕЙ ОТ 10^{-4} МэВ ДО 1 ГэВ НА ОСНОВЕ ГЕТЕРОГЕННОГО ЗАМЕДЛИТЕЛЯ

Чан Нгок Тоан ^{а, б}, Л. Г. Бескровная ^{а, в, 1}, Л. Н. Латышева ²,
Н. М. Соболевский ², Г. Н. Тимошенко ^{а, в}

^а Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

^б Институт физики Вьетнамской академии наук и технологий, Ханой, Вьетнам

^в Государственный университет «Дубна», Дубна, Россия

² Институт ядерных исследований РАН, Москва

Предложена конструкция дозиметра для измерения амбиентной дозы нейтронов с энергией от 10^{-4} МэВ до 1 ГэВ на основе цилиндрического полиэтиленового замедлителя со свинцовой и кадмиевой вставками и ^3He -детектора тепловых нейтронов. Для выбора оптимальной конструкции дозиметра и расчета его энергетической функции чувствительности использовалось численное моделирование методом Монте-Карло на основе программ GEANT4 и SHIELD. Прибор может использоваться для оперативного и стационарного радиационного контроля в полях нейтронов высокоэнергетических ускорителей. Приведено сравнение характеристик дозиметра с зарубежными аналогами.

The construction of a dosimeter for measuring the ambient dose of neutrons with energy from 10^{-4} MeV to 1 GeV based on a cylindrical polyethylene moderator with lead and cadmium inserts and a ^3He -counter of thermal neutrons is proposed. For the optimal design of the dosimeter and calculation of its energy sensitivity function, the numerical Monte Carlo simulations based on the GEANT4 and SHIELD programs were applied. The device can be used for operational and stationary radiation monitoring in neutron fields at high-energy accelerators. Comparison of the dosimeter characteristics with foreign analogs is given.

PACS: 29.90+r; 87.53.Bn

ВВЕДЕНИЕ

Одной из важных и актуальных проблем обеспечения радиационной безопасности на высокоэнергетических ускорителях частиц является измерение дозы нейтронов с энергиями более 10–15 МэВ, поскольку вклад таких нейтронов в полную дозу излучения за защитами ускорителей может быть весомым (до десятков процентов). В то же время подавляющее большинство производимых отечественных и зарубежных дозиметров нейтронов ориентировано на применение в ядерной энергетике или в полях изотопных

¹E-mail: besk@jinr.ru

источников нейтронов, где энергия нейтронов не превышает 10 МэВ, что определяет принцип их работы и рабочий диапазон энергий.

Проблема мониторинга нейтронных полей вокруг ускорительного комплекса NICA осложняется тем, что граница его санитарно-защитной зоны (СЗЗ) в ряде мест подходит близко к источникам излучения, а согласно нормативным документам [1, 2] и проекту коллайдера [3] на границе его СЗЗ должен обеспечиваться предел годовой эффективной дозы для населения 1 мЗв. Доза излучения на расстоянии от высокоэнергетических ускорителей определяется главным образом нейтронами «skyshine» широкого энергетического диапазона. В связи с этим к достоверности измерения доз нейтронов вокруг ускорительного комплекса NICA предъявляются повышенные требования.

Конструкция типичного дозиметра нейтронов включает в себя водородсодержащий (как правило, полиэтиленовый) замедлитель диаметром 20–25 см, внутри которого находится детектор медленных нейтронов. В качестве детекторов медленных нейтронов чаще всего используются пропорциональные счетчики на основе ^3He или борсодержащие счетчики (с аморфным бором или газом BF_3). Функции энергетической зависимости чувствительности таких дозиметров резко снижаются при энергии нейтронов выше 10–20 МэВ, что делает их непригодными для измерения дозы в «жестких» полях нейтронов.

Для регистрации нейтронов высокой энергии можно, в принципе, увеличивать размер замедлителя (известно использование шарового замедлителя диаметром до 18 дюймов), однако в практике работы использовать такой дозиметр затруднительно. Другой возможный путь — применение гетерогенного замедлителя, состоящего из полиэтилена и слоя тяжелого металла (конвертора), служащего для диссипации энергии нейтронов в ядерных реакциях в дополнение к термализации нейтронов за счет упругого рассеяния на водороде полиэтилена. Конвертор можно применять как в виде внешней оболочки замедлителя, так и в виде внутренней вставки в него. Вторым вариантом предпочтительней, так как происходит термализация в полиэтилене всех вторичных нейтронов, вылетающих из конвертора в 4π ср. Эффективный конвертор должен иметь большое сечение n -A-взаимодействий и малое сечение поглощения нейтронов. Наилучшими свойствами в этом смысле обладает вольфрам. Примером использования такого типа конвертора могут являться дозиметры LINUS [4] и WENDI-II [5], рабочий диапазон которых простирается до 1 ГэВ. К сожалению, их доступность ограничена, а стоимость весьма высока из-за использования W-конвертора.

1. ДОЗИМЕТР НЕЙТРОНОВ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ СО СВИНЦОВЫМ КОНВЕРТОРОМ

В настоящей работе рассмотрен вопрос о создании дозиметра высокоэнергетических нейтронов с применением свинцового конвертора. Свинец в качестве материала конвертора много дешевле и технологичней вольфрама, что дает возможность изготовления таких дозиметров на производственной базе ОИЯИ.

Для адекватного измерения амбиентной дозы (амбиентного эквивалента дозы) нейтронов с помощью дозиметра необходимо сконструировать дозиметр таким образом, чтобы энергетическая зависимость его функции чувствительности (ФЧ) имела форму, максимально подобную энергетической зависимости функции чувствительности удельной амбиентной дозы (при единичном флюенсе нейтронов) $h^*(10, E)$ [6] (в идеале они должны

быть линейно зависимыми). Амбиентная доза $H^*(10)$ рекомендована Международной комиссией по радиологической защите [7] в качестве измеряемой величины в отличие от эффективной дозы при мониторинге окружающей среды и в радиационных зонах и является консервативной оценкой эффективной дозы в широком диапазоне значений энергии нейтронов. Для измерения амбиентной дозы необходимо, чтобы поле нейтронов было однородным в пределах чувствительного объема детектора, а детектор имел изотропную чувствительность. Доза $H^*(10)$ спектра нейтронов вычисляется как

$$H^*(10) = \int \Phi(E)h^*(10, E) dE, \quad (1)$$

где E — энергия нейтронов; $\Phi(E)$ — спектр нейтронов.

Если дозиметр имеет функцию чувствительности $R(E)$, близкую к $h^*(10, E)$, т. е. $CR(E) \approx h^*(10, E)$, то амбиентная доза приблизительно определяется через произведение его ФЧ на нормировочный коэффициент C :

$$H^*(10) \approx \int C \cdot R(E)\Phi(E) dE. \quad (2)$$

На практике нормировка (определение C) проводится при градуировке дозиметра в поле эталонных источников нейтронов с известным спектром. В настоящей статье расчетные значения $R(E)$ нормированы к $h^*(10, E)$ при энергии нейтронов 2 МэВ, близкой к средней энергии нейтронов источника ^{252}Cf .

Вид функции $R(E)$ зависит от конструкции дозиметра: его геометрии, материалов замедлителя и конвертора, включения дополнительных элементов для изменения формы $R(E)$ (например, слоя кадмия) и т. д. При моделировании дозиметра варьировались толщина слоя полиэтилена, материал конвертора и его толщина, а также учитывалось влияние слоя кадмия различной толщины и конфигурации вокруг конвертора.

Опыт конструирования дозиметров нейтронов показал, что обеспечить хорошее подобие функции $R(E)$ функции $h^*(10, E)$ во всем диапазоне значений энергии нейтронов от тепловой до 1 ГэВ (11 порядков по энергии) невозможно в силу того, что физика процессов взаимодействия нейтронов столь разных энергий с веществом различается очень сильно. Поэтому было признано целесообразным реализовать максимальное подобие функций в области значений энергии нейтронов выше 0,1 кэВ, поскольку в спектрах нейтронов за защитами и в рассеянных полях вокруг высокоэнергетических ускорителей вклад нейтронов с меньшей энергией в дозу от всех нейтронов пренебрежимо мал. Так, в работе [8] показано, что в спектрах нейтронов на расстояниях 50 и 100 м от центра нуклотрона доля нейтронов с энергией менее даже 10 кэВ в амбиентной дозе составляет 1,3 и 1,4 %.

При конструировании дозиметра предполагалось, что основная часть излучения будет падать на дозиметр сбоку. При измерениях в полях излучения в окружающей среде геометрия облучения дозиметра может быть близка к изотропной геометрии в верхней полусфере. Преимущественное облучение дозиметра снизу не планировалось.

2. МОДЕЛИРОВАНИЕ КОНСТРУКЦИИ ДОЗИМЕТРА

В работе проведены модельные расчеты различных конструкций дозиметра для демонстрации их влияния на функции чувствительности до энергии нейтронов 1 ГэВ. Базовая конструкция дозиметра выбрана в виде цилиндра с примерно равными диаметром

и высотой (22,9 и 23,5 см соответственно), что является компромиссом между технологичностью и желательной изотропностью детектора. Гетерогенный дозиметр состоит из замедлителя (полиэтилен с $\rho = 0,92 \text{ г/см}^3$), свинцового конвертора ($\rho = 11,35 \text{ г/см}^3$), слоя кадмия и пропорционального ^3He -счетчика для регистрации медленных нейтронов. Основной реакцией медленных нейтронов с ^3He является экзотермическая реакция $n + ^3\text{He} = p + ^3\text{H}$, сечение которой спадает с уменьшением энергии нейтрона обратно пропорционально его скорости. Выделяемая в реакции энергия $E = 764 \text{ кэВ}$ распределяется между протоном и тритоном обратно пропорционально их массам. Каждый акт реакции сопровождается формированием импульса счетчика. Еще одной регистрируемой счетчиком реакцией является упругое рассеяние нейтрона на ядре ^3He , характеризующееся постоянством сечения в широком диапазоне значений энергии. При энергиях нейтронов более нескольких мегаэлектронвольт начинаются неупругие ядерные реакции $n + ^3\text{He}$ с рождением дейтронов, которые также могут давать вклад в счет детектора. Сечения реакций нейтронов с ^3He показаны на рис. 1.

^3He не обладает высокой тормозной способностью, поэтому производители иногда добавляют в него примесь тяжелых инертных газов Аг или Кг для уменьшения пробега протонов и тритонов, не всегда сообщая об этом в технических характеристиках, поскольку при использовании счетчиков для регистрации медленных нейтронов инертные газы не влияют на чувствительность счетчиков (при упругом рассеянии на Аг и Кг нейтронов энергия ядер отдачи слишком мала, чтобы создать импульс счетчика). Однако при высоких энергиях нейтронов открываются каналы неупругих реакций нейтронов с ядрами примеси с образованием заряженных частиц, которые могут регистрироваться счетчиком. При моделировании дозиметра полагалось, что его детектор медленных нейтронов представляет собой цилиндрический счетчик с активным диаметром 24,4 мм (толщина стенок из нержавеющей стали 0,5 мм) и активной длиной 76,2 мм, заполненный чистым ^3He под давлением 5 атм.

Для моделирования конструкции дозиметра и расчета его ФЧ использовался программный пакет GEANT4 (версия 10.03.p02) [9]. При взаимодействии с веществом нейтронов с энергиями 0,025 эВ–20 МэВ в программе применяются таблицы экспериментально измеренных сечений G4NDL на основе оцененных нейтронных данных ENDF/B-VII. В области энергий нейтронов ниже 4 эВ при взаимодействии нейтронов с водородом расчеты проводились с применением термической модели, учитывающей взаимодействие нейтронов с химически связанными атомами водорода. Для описания взаимодействия высокоэнергетических нейтронов (20 МэВ–1 ГэВ) с веществом применялась модель внутриядерного каскада Binary Cascade.

В результате выполненных расчетов по оптимизации конструкции дозиметра выбраны следующие его параметры: внешний полиэтиленовый замедлитель — цилиндр радиусом 11,43 см и высотой 23,5 см, внутри которого размещен цилиндрический слой свинца

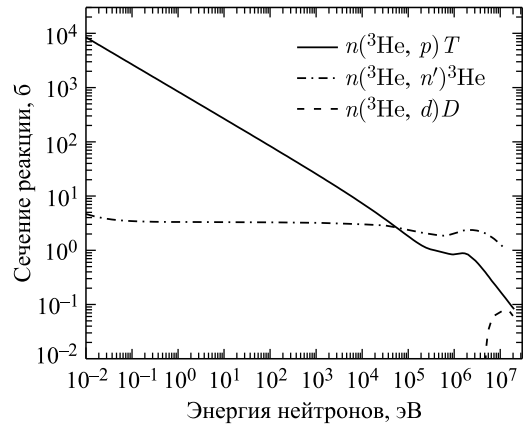


Рис. 1. Сечения реакций нейтронов с ^3He

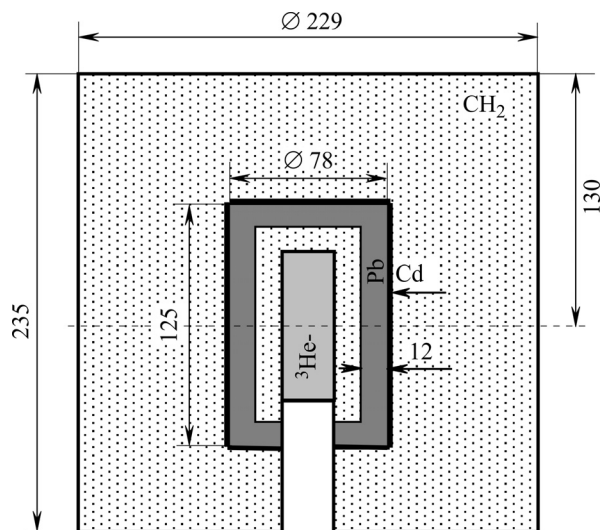


Рис. 2. Схематический вид дозиметра в разрезе (размеры в миллиметрах)

толщиной 1,2 см, высотой 12,5 см и внешним радиусом, равным 3,9 см. Свинцовый конвертор покрыт слоем кадмия ($\rho = 8,65 \text{ г/см}^3$) толщиной 0,7 мм для увеличения поглощения резонансных и тепловых нейтронов. Схематический разрез дозиметра представлен на рис. 2.

2.1. Расчет функции чувствительности дозиметра. При расчете ФЧ дозиметра рассматривались геометрии бокового и верхнего облучений дозиметра плоским однородным полем моноэнергетических нейтронов в диапазоне значений энергии от 0,1 кэВ до 1 ГэВ. При этом определялось число заряженных частиц (протонов, дейтронов, тритонов), рожденных внутри активного объема счетчика во всех реакциях с ^3He (энергетический порог регистрации частиц не задавался, т. е. акт образования заряженной частицы соответствовал акту регистрации импульса счетчика). Аналогично полагалось, что каждый акт упругого рассеяния нейтрона на ^3He приводит к регистрации импульса счетчика за счет ионизации газа ядром отдачи. Помимо заряженных частиц, рождаемых в самом счетчике нейтронами, существует также вклад регистрируемых событий от заряженных частиц, рожденных нейтронами в материалах дозиметра вне счетчика. Расчеты показали, что во всем диапазоне значений энергии падающих на дозиметр нейтронов подавляющий вклад в регистрацию событий дает реакция $n(^3\text{He}, p)^3\text{H}$. Вклад всех других процессов не превышал 1,5 %, поэтому в дальнейших расчетах они не учитывались при анализе результатов.

Для выбора оптимальной толщины свинцового конвертора были выполнены расчеты для толщины боковых стенок конвертора и его торцов 8–15 мм при сохранении толщины внешнего и внутреннего слоев полиэтиленового замедлителя. Толщина свинцового конвертора влияет на соотношение числа нейтронов, испытавших ядерные взаимодействия в конверторе, и числа нейтронов, термализуемых за счет упругих соударений с водородом замедлителя, т. е. определяет вклад разных механизмов в диссипацию энергии нейтронов и, таким образом, меняет спектр нейтронов, проникающих в объем ^3He -счетчика. В результате была выбрана толщина слоя свинца, равная 12 мм, при которой достига-

ется удовлетворительное согласие между ФЧ дозиметра и энергетической зависимостью удельной AMBIENTНОЙ дозы в области значений энергии нейтронов более 10 МэВ. Дальнейшее увеличение толщины слоя свинца слабо влияет на ход ФЧ, но увеличивает массу дозиметра. При выбранной конфигурации конвертора общая масса дозиметра составляет около 13 кг.

Рассматривался также вариант конструкции дозиметра с конвертором из вольфрама толщиной 1,2 см с плотностью $\rho = 19,3$ и $10,62$ г/см³ (соответствует плотности конвертора дозиметра WENDI-II, изготовленного методом порошковой металлургии), при отсутствии кадмия вокруг конвертора и боковом облучении дозиметра. На рис. 3 представлены отношения откликов дозиметра с различными конверторами (W и Pb) к отклику дозиметра без конвертора для энергии нейтронов больше 10 МэВ. Максимальная величина отклика получена с конвертором нейтронов из свинца в области значений энергии больше 10 МэВ. Полные сечения взаимодействия нейтронов с вольфрамом и свинцом в области больших значений энергии нейтронов примерно одинаковы, а сечение захвата тепловых нейтронов у свинца существенно меньше, чем у вольфрама.

Наличие кадмиевой прослойки улучшает $R(E)$ в области значений энергии ниже 1 МэВ. На рис. 4 видно, что отсутствие кадмия приводит к значительному отличию вида функции чувствительности $R(E)$ дозиметра от вида $h^*(10, E)$. Применение кадмиевого слоя толщиной 0,7 мм вокруг свинцового конвертора толщиной 1,2 см позволило получить оптимальное значение $R(E)$ в области значений энергии нейтронов 10^{-4} – 10^3 МэВ.

Выбор физической модели взаимодействия нейтронов с веществом также может влиять на расчет функции $R(E)$. Однако отличие расчетов по модели Binary Cascade в сочетании с термической моделью для полиэтилена и медленными нейтронами от расчетов по модели Bertini, считающейся более предпочтительной при описании взаимодействия нейтронов с тяжелыми веществами, пренебрежимо мало, за исключением области значений энергии более 20 МэВ, где модель Bertini дает немного большие (на $\sim 10\%$) значения $R(E)$.

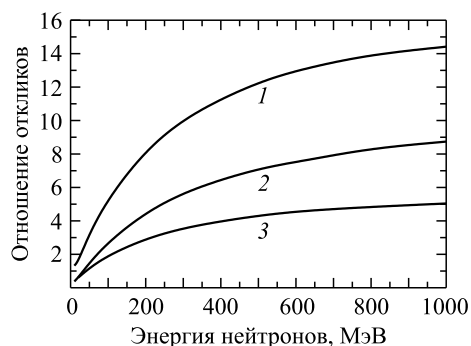


Рис. 3. Отношение откликов дозиметров с конверторами толщиной 1,2 см из свинца (1), вольфрама плотностью $19,3$ г/см³ (2) и вольфрама плотностью $10,62$ г/см³ (3) к отклику дозиметра без конвертора

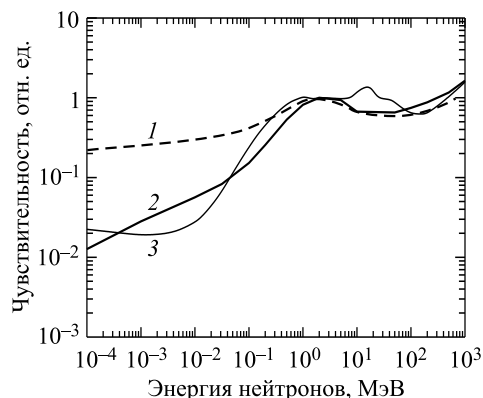


Рис. 4. Чувствительность дозиметра при боковом облучении нейтронами в отсутствие кадмиевого слоя (1) и при наличии кадмиевого слоя 0,7 мм (2) вокруг свинцового конвертора, 3 — функция $h^*(10, E)$ (нормировка при 2 МэВ)

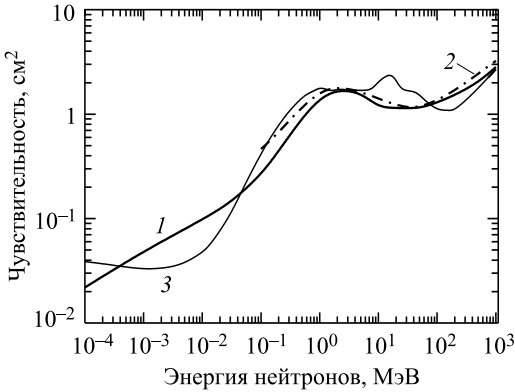


Рис. 5. Сравнение чувствительностей дозиметра при боковом облучении нейтронами: 1 — чувствительность, рассчитанная по программе GEANT4; 2 — чувствительность, рассчитанная по программе SHIELD; 3 — функция $h^*(10, E)$ (нормировка при 2 МэВ)

Также были выполнены расчеты функции чувствительности дозиметра при его боковом облучении нейтронами с помощью программы SHIELD [10], позволяющей моделировать взаимодействие нейтронов с веществом в области значений энергии до 1 ТэВ. Для расчетов взаимодействия нейтронов с веществом с энергией $\geq 14,5$ МэВ и до 1 ГэВ в программе используется каскадная модель ядерной реакции на основе дубненской модели внутриядерных каскадов [11]. Перенос нейтронов с энергией ниже 14,5 МэВ в программе SHIELD моделируется на основе 28-групповой системы нейтронных констант БНАБ [12]. Сравнение ФЧ дозиметра, полученных с помощью программ GEANT4 и SHIELD, показывает, что для энергии нейтронов выше 0,1 МэВ наблюдается очень хорошее согласие между двумя функциями чувствительности (рис. 5).

Статистическая ошибка при расчетах функций чувствительности не превышала 5 %.

2.2. Сравнение предложенного дозиметра с дозиметрами WENDI-II и LINUS. Предложенная в настоящей работе конструкция дозиметра обеспечивает удовлетворительное измерение амбиентной дозы нейтронов в диапазоне 10^{-4} – 10^3 МэВ, за исключением областей значений энергии $\sim 4 \cdot 10^{-3}$, 0,2 и 20 МэВ, в которых максимальная дифференциальная погрешность составляет около 200 %. На рис. 6 представлено сравнение функций чувствительности предложенного дозиметра и коммерчески доступных дозиметров WENDI-II и LINUS. Все функции нормированы на одинаковую величину при энергии

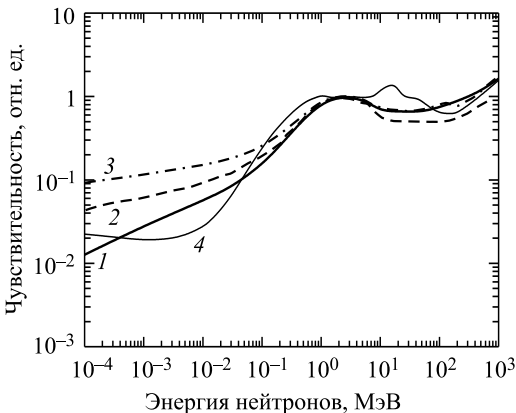
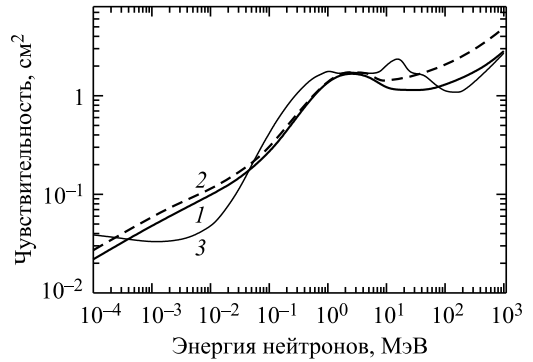


Рис. 6. Сравнение функций чувствительности $R(E)$ дозиметров при боковом облучении нейтронами: 1 — функция чувствительности предложенного в статье дозиметра; 2 — функция чувствительности дозиметра LINUS; 3 — функция чувствительности дозиметра WENDI-II; 4 — функция $h^*(10, E)$ (нормировка при 2 МэВ)

Рис. 7. ФЧ дозиметра при различной ориентации падающих на него нейтронов: 1 — случай бокового облучения; 2 — случай облучения торца дозиметра сверху; 3 — функция $h^*(10, E)$ (нормировка при 2 МэВ) [6]



нейтронов 2 МэВ, что соответствует условиям градуировки нейтронов с помощью источника нейтронов ^{252}Cf .

Сравнение показывает, что ФЧ предложенного в настоящей работе дозиметра согласуется в целом с функцией $h^*(10, E)$ существенно лучше, чем у дозиметров WENDI-II и LINUS во всем диапазоне значений энергии нейтронов.

При измерениях вблизи боковой защиты ускорителей излучение носит преимущественно направленный характер, поэтому выше речь шла о боковом облучении дозиметра. Однако ФЧ дозиметра зависит от угла падения на него нейтронов, несмотря на то, что дозиметр сделан (по возможности) изотропным. На рис. 7 показана для сравнения ФЧ дозиметра при торцевом облучении дозиметра нейтронами.

При верхнем торцевом облучении значение $R(E)$ заметно повышается в области значений энергии нейтронов выше 10 МэВ (в среднем в 1,5–1,9 раза). Но с учетом занижения ФЧ в области значений энергии 10–100 МэВ по сравнению с $h^*(10, E)$ при боковом облучении дозиметра этот факт не приведет к существенным погрешностям измерений даже в изотропном поле облучения.

3. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ ПРОВЕРКА АДЕКВАТНОСТИ ПОКАЗАНИЙ ДОЗИМЕТРА В ПОЛЯХ РАССЕЯННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ВОКРУГ ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСКОРИТЕЛЕЙ

Для тестирования дозиметра были выполнены расчетные эксперименты на основе известных высокоэнергетических спектров нейтронов «skyshine» [8], спектра нейтронов опорного поля на фазотроне ОИЯИ [13], спектра нейтронов опорного поля «Concrete, side» (ЦЕРН) [14] и спектра на 12-ГэВ синхротроне КЕК [14]. Для этого сравнивались амбиентные дозы нейтронов, рассчитанные по ФЧ дозиметра для указанных спектров («измеренные» дозы), и амбиентные дозы нейтронов, полученные путем свертки спектров с зависимостью $h^*(10, E)$ в условиях бокового облучения («истинные» дозы). Спектры нейтронов приведены на рис. 8.

Результаты тестирования приведены в таблице. Амбиентная доза нейтронов, полученная путем свертки спектра с $h^*(10, E)$, в таблице обозначена как $H^*(10)$, а амбиентная доза, полученная по ФЧ дозиметра, обозначена как $H^*(10)_д$.

Видно, что показания дозиметра в этих полях нейтронов отличаются от значений амбиентной дозы нейтронов $H^*(10)$ не больше чем на 30 %, что полностью удовлетворяет

требованиям к точности измерений при оперативном и зонном радиационном контроле. Таким образом, предложенный дозиметр обладает рядом преимуществ в сравнении с коммерчески доступными зарубежными аналогами и может применяться для измерения амбиентной дозы и мониторинга радиационной обстановки в полях нейтронов высокоэнергетических ускорителей.

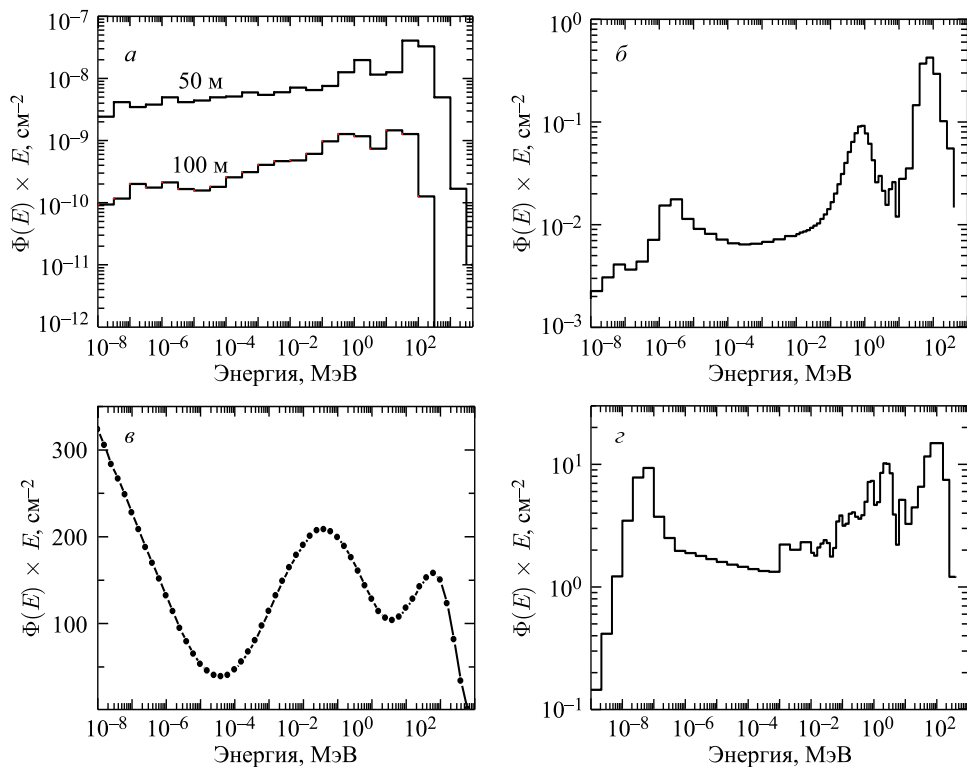


Рис. 8. Спектры нейтронов, использованных для тестирования дозиметра: а) спектры нейтронов «skyshine» на расстоянии 50 и 100 м от центра нуклотрона ОИЯИ, рассчитанные по программе GEANT4 [8]; б) спектр нейтронов на синхротроне КЕК (location 11) [14]; в) спектр нейтронов опорного поля на обваловке фазотрона ОИЯИ [13]; з) спектр нейтронов в опорном поле ЦЕРН [14]

Сравнение «измеренных» дозиметром амбиентных доз с «истинными» значениями амбиентных доз для спектров нейтронов при боковом облучении дозиметра нейтронами

Спектр нейтронов	$H^*(10)_д$, пЗв	$H^*(10)$, пЗв	$H^*(10)/H^*(10)_д$
Спектр «skyshine» 50 м (рис. 8, а)	$8,6 \cdot 10^{-17}$	$1,1 \cdot 10^{-16}$	1,3
Спектр «skyshine» 100 м (рис. 8, а)	$3,8 \cdot 10^{-18}$	$5,3 \cdot 10^{-18}$	1,3
Синхротрон КЕК 12 ГэВ (рис. 8, б)	$6,7 \cdot 10^{-10}$	$8,0 \cdot 10^{-10}$	1,2
Опорное поле фазотрона ОИЯИ (рис. 8, в)	$3,0 \cdot 10^{-10}$	$3,7 \cdot 10^{-10}$	1,2
Опорное поле ЦЕРН (рис. 8, з)	$5,2 \cdot 10^{-10}$	$6,30 \cdot 10^{-10}$	1,3

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Нормы радиационной безопасности (НРБ-99/2009). Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора, 2009. СанПиН 2.6.1.2523-09.
2. Основные санитарные правила обеспечения радиационной безопасности (ОСПОРБ-99/2010). Минздрав России, 2010. СП 2.6.1.2612-10.
3. Размещение тяжелоионного коллайдера NICA на площадке ЛФВЭ ОИЯИ в г. Дубне с частичной реконструкцией здания №1. Здание 17. Проектная документация. Разд. 5, подразд. 6 «Технологические решения». Кн. 2, часть «Расчеты по радиационной безопасности» 318Б-063-ИОС6.2. Т. 5.6.2. Дубна, 2011.
4. *Birattari C., Esposito A., Pellicioni M., Rancati T., Silari M.* The Extended Range Neutron REM Counter «LINUS» — Overview and Latest Developments // *Rad. Prot. Dos.* 1998. V. 76. P. 133–148.
5. *Olsher R. H., Hsu H. H., Berverding A., Kleck J. H., Casson W. H., Vasilik D. G., Devine R. T.* WENDI: An Improved Neutron REM Meter // *Health Phys.* 2000. V. 79. P. 170–181.
6. Conversion Coefficients for Use in Radiological Protection against External Radiation // *Ann. ICRP.* 1996. V. 26, No. 3/4.
7. 1990 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 60 // *Ann. ICRP.* 1991. V. 21, No. 1/3.
8. *Бескровная Л. Г., Гусева С. В., Тимошенко Г. Н.* Метод мониторинга полей нейтронов вокруг высокоэнергетических ускорителей // *Письма в ЭЧАЯ.* 2018. Т. 15, № 3(215). С. 286–294.
9. *Agostinelli S. et al.* GEANT4 — A Simulation Toolkit // *Nucl. Instr. Meth. A.* 2003. V. 506. P. 250–303.
10. *Dementyev A. V., Sobolevsky N. M.* SHIELD — Universal Monte Carlo Hadron Transport Code: Scope and Applications // *Rad. Meas.* 1999. V. 30. P. 553.
11. *Toneev V. D., Gudima K. K.* Particle Emission in Light and Heavy-Ion Reactions // *Nucl. Phys. A.* 1983. V. 400. P. 173–190.
12. *Абагян Л. Р., Базазянц Н. О., Николаев М. Н., Цибуля А. М.* Групповые константы для расчета реакторов и защиты. М.: Энергоиздат, 1981.
13. *Aleimikov V. E. et al.* Reference Neutron Fields for Metrology of Radiation Monitoring // *Rad. Prot. Dosim.* V. 54, No. 1. P. 57–59.
14. Compendium of Neutron Spectra and Detector Response for Radiation Protection Purpose: Technical Report Series. Vienna: IAEA, 2001. No. 403. P. 154–163.

Получено 15 августа 2018 г.