ПРИБОРЫ И ТЕХНИКА ЭКСПЕРИМЕНТА, 2025, № 2, с. 59–65

ТЕХНИКА ЯДЕРНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА

УДК 539.125.525.348+539.16.07

РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОБОСНОВАНИЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПРОПОРЦИОНАЛЬНОГО СЧЕТЧИКА ДЛЯ МОНИТОРИРОВАНИЯ ПЛОТНОСТИ ПОТОКА НЕЙТРОНОВ ГЕНЕРАТОРА НГ-11И

© 2025 г. С. А. Черышов[a,*], И. Ю. Дроздов[a], С. П. Котков[a], В. В. Гаганов[a]

[a] *Российский федеральный ядерный центр – Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики Россия, 607188, Саров, Нижегородская область, просп. Мира, 37*

** e-mail: SACheryshov@vniief.ru*

Поступила в редакцию 14.12.2023 г.
После доработки 03.02.2025 г.
Принята к публикации 25.02.2025 г.

Предложено использовать пропорциональный счетчик СНМ-11 для мониторирования плотности потока нейтронов генератора НГ-11И. С использованием метода Монте-Карло, выполнены расчетные исследования характеристик нейтронного поля в экспериментальном зале генератора, выбрано оптимальное место размещения пропорционального счетчика. Экспериментально определен коэффициент пропорциональности между плотностью потока нейтронов и скоростью счета СНМ-11.

DOI: 10.31857/S0032816225020053, **EDN:** GJFDUZ

1. ВВЕДЕНИЕ

В РФЯЦ–ВНИИЭФ проводятся испытания узлов электроники и элементной базы на стойкость к воздействию гамма-излучения и нейтронов. Одной из установок, используемых в испытаниях, является нейтронный генератор НГ-11И (см. рис. 1), обеспечивающий выход в полный телесный угол до 10^{11} нейтронов в секунду со средней энергией 14.2 МэВ [1]. При проведении подобных испытаний необходимо иметь информацию о характеристиках нейтронного поля НГ-11И, в которое помещается исследуемый объект. В данной работе рассматривается возможность применения пропорционального счетчика для мониторирования выхода нейтронов из мишени нейтронного генератора НГ-11И.

Система мониторирования нейтронного поля должна отвечать ряду требований, таких как:

– возможность регистрации как DT-, так и DD-нейтронов;

– избирательная регистрация нейтронов на фоне сопровождающего их гамма-излучения – не более одного зарегистрированного гамма-кванта на 100 нейтронов;

– малое “мертвое” время системы – не более 1 мкс;

– простота, надежность и долговечность конструкции.

Все эти требования реализуются при использовании пропорциональных счетчиков, хорошо зарекомендовавших себя при проведении экспериментов в области ядерной физики, в дозиметрии, а также для контроля уровня нейтронного потока в промышленных ядерных реакторах [2–5].

Для мониторирования плотности потока (флюенса) быстрых нейтронов при выходе генератора от 10^9 до 10^{11} нейтронов в секунду предполагается использовать счетчик с борной облицовкой СНМ-11 [2]. Конструктивно данный счетчик представляет собой трубку из нержавеющей стали, которая является катодом, в качестве анода выступает металлическая нить, натянутая по оси счетчика (см. рис. 2). Внутренняя поверхность трубки покрыта тонким слоем (3 мкм)

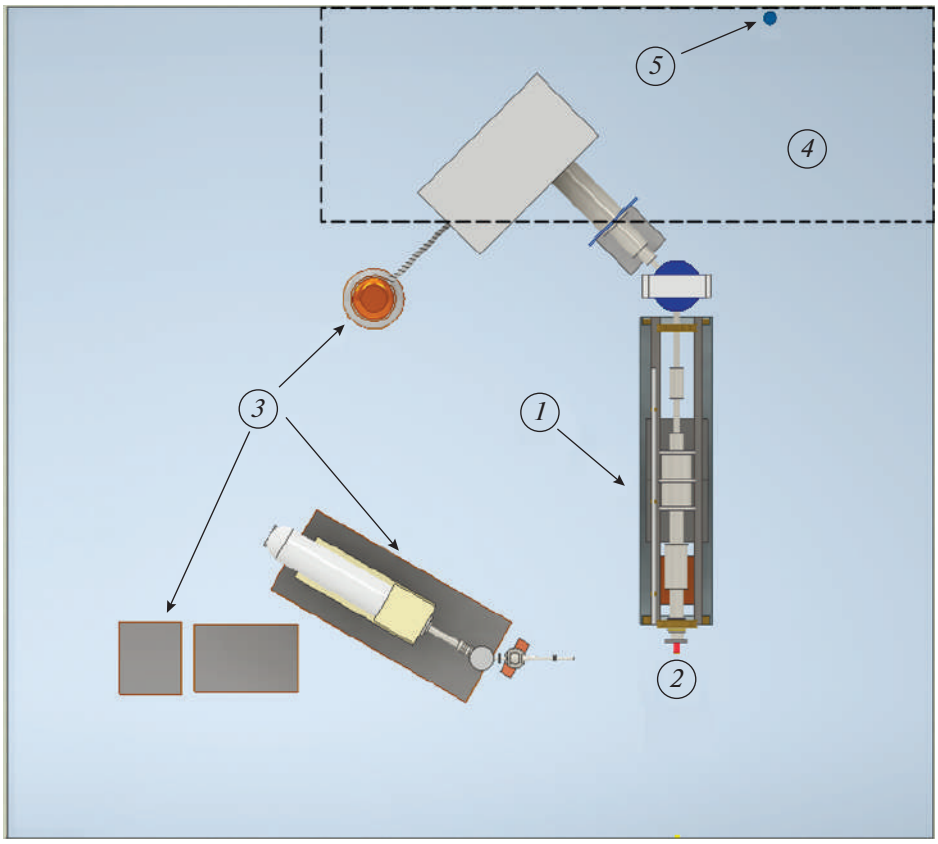

Рис. 1. Геометрия экспериментального зала НГ-11И (вид сверху): *1* – генератор НГ-11И, *2* – область размещения облучаемого образца (расстояние до нейтрон-образующей мишени составляет 5.3 см), *3* – вспомогательное оборудование, *4* – предполагаемая область размещения пропорционального счетчика СНМ-11, *5* – пропорциональный счетчик СНМ-11.

аморфного бора, обогащенного до 80% изотопом ^{10}B. Рабочий объем счетчика заполнен гелием с примесью аргона. Счетчик СНМ-11 работает на основе реакции ^{10}B(n, α)^{7}Li, сечение которой максимально в тепловой и медленной областях спектра нейтронов.

2. ОПРЕДЕЛЕНИЕ МЕСТА РАЗМЕЩЕНИЯ СЧЕТЧИКА

Пропорциональный счетчик необходимо устанавливать на позиции, где будут преобладать медленные нейтроны в диапазоне энергий

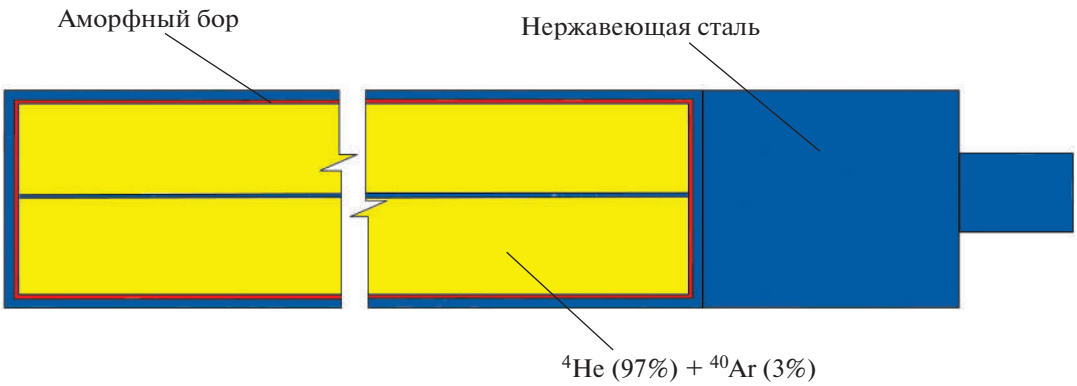

Рис. 2. Расчетная модель пропорционального счетчика СНМ-11.

от 10^{-4} до 100 эВ. Для определения оптимального места размещения счетчика необходимо проведение расчетов интегральных и спектральных характеристик нейтронного поля, реализующегося при работе генератора НГ-11И.

Для расчета характеристик нейтронного поля в зале генератора НГ-11И была создана расчетная модель в программном пакете PHITS [4]. В модели используется точечный, изотропный и моноэнергетический источник нейтронов с энергией 14.2 МэВ. Данное приближение обусловлено тем, что в решаемой задаче учет энергетического спектра нейтронов, генерируемых в мишени НГ-11И, не вносит значимых поправок в скорость счета пропорционального счетчика. Геометрическая модель экспериментального зала (рис. 1) была разделена на ячейки размером $10\times10\times10$ см^3, и в каждой из данных ячеек рассчитывался спектр нейтронов в диапазоне энергий от 10^{-4} эВ до 100 эВ.

Результат расчета пространственного распределения флюенса медленных нейтронов представлен на рис. 3. По результатам расчетов было установлено, что непосредственно у стены экспериментального зала генератора НГ-11И в спектре будет присутствовать существенная доля медленных нейтронов (55% от общего числа нейтронов в спектре, рис. 4). Высокая доля медленных нейтронов, в том числе и тепловых, в спектре нейтронов связана с тем, что нейтроны эффективно теряют свою энергию в результате многократных актов упругого рассеяния на ядрах атомов водорода и углерода, входящих в состав бетонных стен экспериментального зала. Поэтому вблизи стены формируется равномерное поле медленных нейтронов. Область, оптимальная для размещения пропорционального счетчика, выделена на рис. 3 штриховой линией.

Одним из основных параметров, которые необходимо учитывать при выборе места размещения пропорционального счетчика, является его скорость счета. Она должна находиться в определенном диапазоне значений, не превышая значения, при котором заметным становится влияние “мертвого” времени счетчика (порядка 10^5 с$^{-1}$), и не опускаясь ниже величины, статистически достаточной для оперативной коррекции нейтронного выхода генератора (порядка 10^2 с$^{-1}$). Для оценки скорости счета пропорционального счетчика удобно использовать результаты расчета количества взаимодействий нейтронов с ядрами рабочего вещества счетчика, поскольку эта величина дает верхний предел скорости счета счетчика. Для расчета

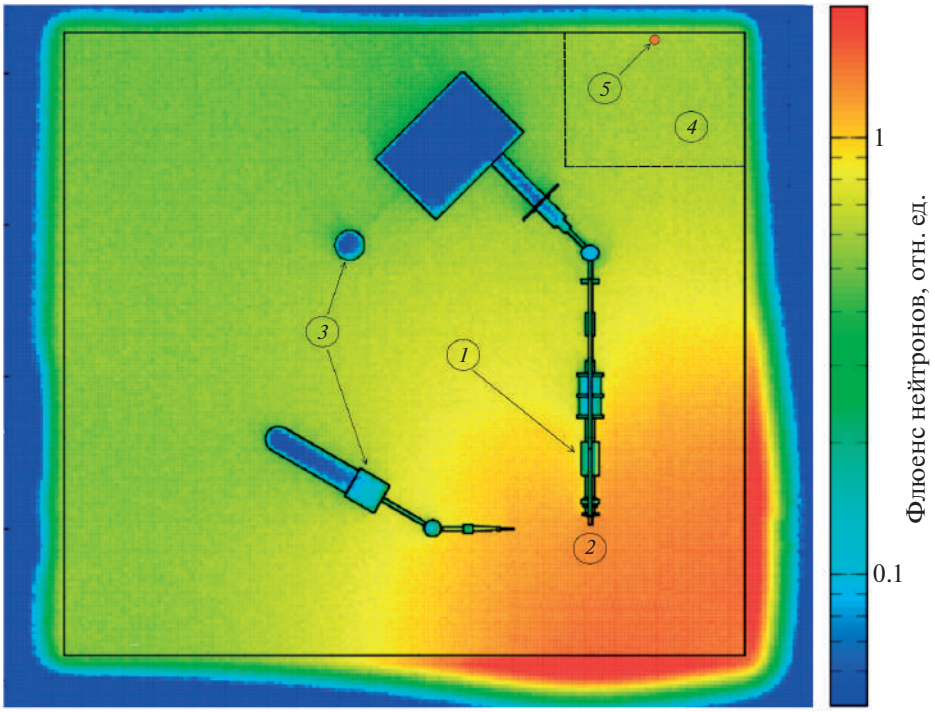

Рис. 3. Распределение флюенса быстрых нейтронов в экспериментальном зале НГ-11И (срез на уровне мишени): *1* – генератор НГ-11И, *2* – область размещения облучаемого образца, *3* – вспомогательное оборудование, *4* – область размещения пропорционального счетчика СНМ-11, *5* – пропорциональный счетчик СНМ-11.

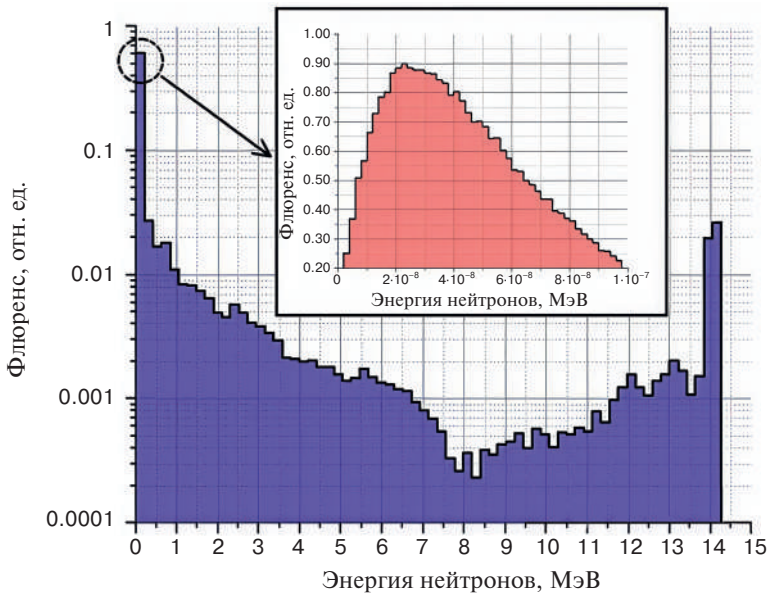

Рис. 4. Расчетный спектр нейтронов в дальней области зала.

количества взаимодействий в рабочем веществе в модель экспериментального зала генератора НГ-11И была добавлена расчетная модель счетчика СНМ-11 (см. рис. 2).

С помощью расчетной модели была проведена оценка скорости счета счетчика СНМ-11, который был размещен непосредственно у стены экспериментального зала генератора (рис. 3). Расчеты показали, что при выходах генератора в диапазоне от 10^9 до 10^{11} нейтронов в секунду, скорость счета пропорционального счетчика изменяется в диапазоне от $7 \cdot 10^2$ до $7 \cdot 10^4$ $с^{-1}$ со статистической погрешностью расчета в 1%. Полученный диапазон скорости счета счетчика в данной позиции полностью соответствует указанным выше требованиям для скорости счета.

3. ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАБОЧИХ ПАРАМЕТРОВ СЧЕТЧИКА

При работе со счетчиком СНМ-11 необходимо учитывать влияние аппаратурных шумов на его показания. Так же нужно учесть, что наличие нейтронного поля в экспериментальном зале генератора НГ-11И неизбежно приводит к формированию поля гамма-излучения, которое вносит свой вклад в скорость счета пропорционального счетчика. Гамма-излучение, в основном, возникает за счет реакций неупругого рассеяния нейтронов на ядрах материалов, в частности на ядрах ^{56}Fe, которые входят в элементы конструкции генератора нейтронов, и на ядрах ^{16}O, которые присутствуют в воздухе и бетонных стенах экспериментального зала.

Чтобы с помощью счетчика СНМ-11 осуществлять избирательную регистрацию нейтронов на фоне аппаратурных шумов и гамма-излучения, необходимо установить порог дискриминации по амплитуде регистрируемых сигналов. Порог дискриминации определяется по экспериментально измеренной дискриминационной характеристике пропорционального счетчика. Для измерения дискриминационной характеристики был собран измерительный канал, блок-схема которого представлена на рис. 5. Счетчик СНМ-11 подключается к фильтру, разделяющему сигналы со счетчика и высокое напряжение, подаваемое на счетчик. Для усиления и формирования сигнала используется усилитель. Длина кабеля, соединяющего счетчик и усилитель, не превышает 1.5 м, что уменьшает вероятность возникновения наведенных импульсов.

Измерение дискриминационной характеристики детектора с использованием генератора НГ-11И в качестве источника нейтронов является ресурсозатратной задачей, поэтому измерения были выполнены с использованием радиоизотопных источников нейтронов и гамма-излучения.

Для измерения дискриминационной характеристики счетчика СНМ-11, реализующейся при облучении счетчика нейтронами, использо-

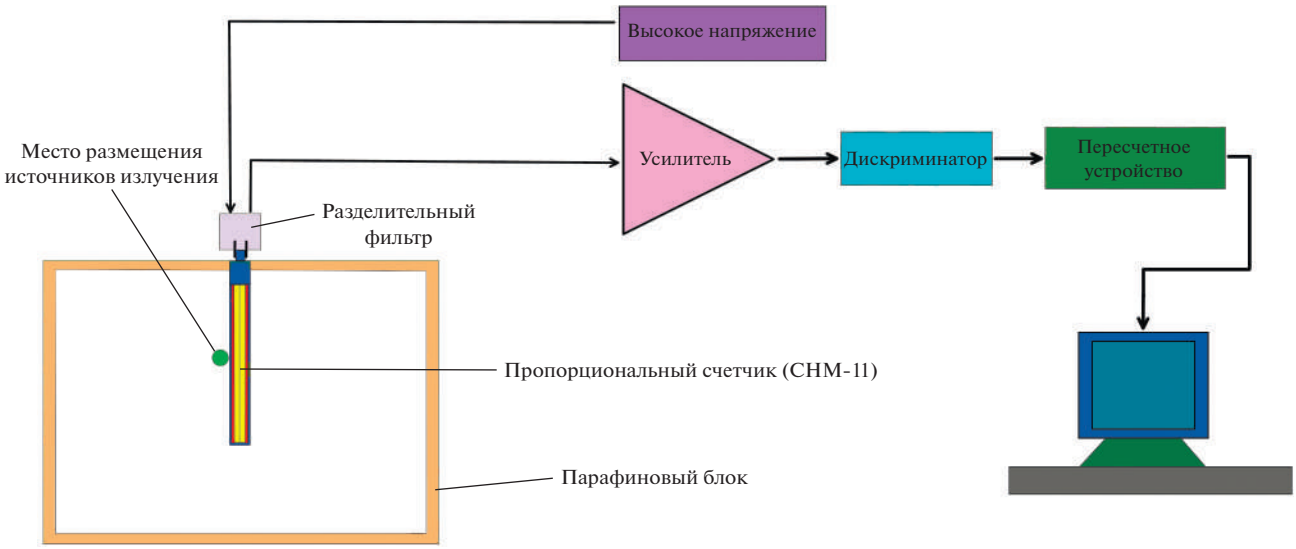

Рис. 5. Блок-схема измерительного канала.

вался ^{252}Cf-источник, интенсивность которого составляла порядка 10^4 с$^{-1}$. Источник помещался в полиэтиленовый блок вместе со счетчиком, чтобы внутри блока сформировалось поле медленных нейтронов.

С помощью собранного измерительного канала на ^{252}Cf-источнике проводилось измерение числа отсчетов пропорционального счетчика за 150 секунд при установленном пороге дискриминации. Порог изменялся в диапазоне 160–1750 мВ. Измерения проводились в несколько этапов. На первом этапе снималась зависимость числа отсчетов от величины порогового напряжения при облучении счетчика нейтронами. На втором этапе измерений снималась та же зависимость, но без источника нейтронов, чтобы счетчик регистрировал только шумы аппаратуры. Полученные дискриминационные характеристики представлены на рис. 6.

Для измерения дискриминационной характеристики счетчика СНМ-11, реализующейся при облучении счетчика гамма-излучением,

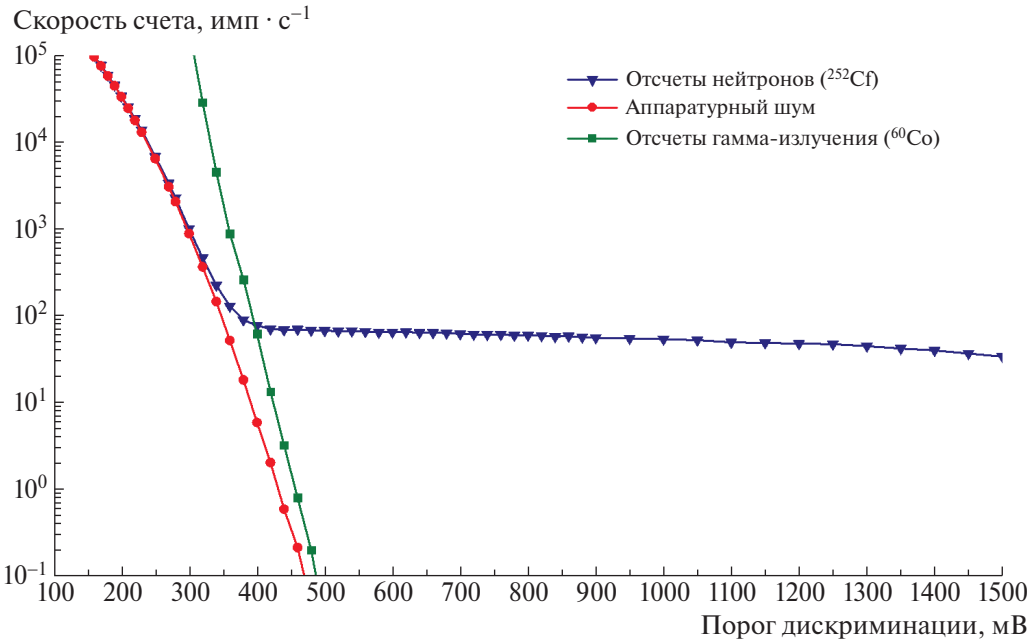

Рис. 6. Дискриминационная характеристика счетчика СНМ-11.

использовался ^{60}Co-источник с активностью $1 \cdot 10^6$ с$^{-1}$. Источник размещался на расстоянии 1 см от счетчика, при этом мощность дозы гамма-излучения, приходящейся на счетчик, составляла порядка 0.2 рад·ч$^{-1}$. Условия облучения счетчика определялись исходя из требований по мощности дозы гамма-излучения, реализующейся в экспериментальном зале НГ-11И в области размещения счетчика (порядка 0.15 Рад·ч$^{-1}$). Результаты аналогичных измерений для ^{60}Co представлены на рис. 6.

Исходя из проведенных измерений для счетчика СНМ-11, был выбран порог дискриминации 500 мВ, выше которого счетная аппаратура не будет регистрировать аппаратурные шумы и импульсы от гамма-излучения.

4. КАЛИБРОВКА ПОКАЗАНИЙ СЧЕТЧИКА

Для определения коэффициента пропорциональности между плотностью потока нейтронов в месте размещения объектов исследования и скоростью счета пропорционального счетчика в экспериментальном зале генератора НГ-11И в области размещения исследуемых объектов (на расстоянии 5.3 см от мишени НГ-11И) было размещено два активационных детектора из алюминия и ниобия. Одновременно с облучением детекторов проводилось измерение скорости счета счетчика СНМ-11. После окончания облучения по измеренной активности была определена плотность потока нейтронов Ф в месте размещения активационных детекторов. Плотность потока нейтронов определялась по наведенной в детекторах активности [7]. Было проведено четыре серии измерений. Средняя плотность потока Ф по реакциям ^{27}Al(n, p)^{27}Mg, ^{27}Al(n, α)^{24}Na, ^{93}Nb(n, 2n)^{92m}Nb, а также средняя скорость счета счетчика СНМ-11 за время облучения, представлены в табл. 1.

Таблица 1. Результаты калибровочных измерений

Номер серии	Ф, см$^{-2}$·с$^{-1}$	$\dot{N}$, с$^{-1}$	k, см$^{-2}$
1	$8.76 \cdot 10^7$	18565	$4.72 \cdot 10^3$
2	$9.52 \cdot 10^7$	20855	$4.56 \cdot 10^3$
3	$9.49 \cdot 10^7$	20542	$4.62 \cdot 10^3$
4	$9.11 \cdot 10^7$	20227	$4.50 \cdot 10^3$

По полученным значениям средней плотности потока нейтронов Ф и средней скорости счета счетчика $\dot{N}$ в каждом эксперименте был определен коэффициент пропорциональности $k = \Phi / \dot{N}$. За оценку истинного значения коэффициента k было принято среднее по четырем измерениям, составившее $4.60 \cdot 10^3$ см$^{-2}$. Статистическая погрешность полученной оценки составила 3%. С учетом погрешности измерения Ф (4%) относительная погрешность коэффициента пропорциональности δk составила 5%.

Используя полученный коэффициент, можно по числу отсчетов пропорционального счетчика СНМ-11 в режиме реального времени судить о величине плотности потока нейтронов генератора НГ-11И в месте размещения облучаемого образца.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выполнена оценка возможности использования пропорционального счетчика для мониторирования плотности потока нейтронов генератора НГ-11И. Методом Монте-Карло выполнен расчет характеристик поля нейтронного излучения в зале генератора и определено оптимальное место размещения счетчика. Экспериментально определены рабочие параметры счетчика: порог дискриминации и коэффициент пропорциональности между плотностью потока нейтронов генератора НГ-11И и скоростью счета счетчика СНМ-11. Результаты работы позволят в режиме реального времени осуществлять мониторирование плотности потока быстрых нейтронов (DD и DT) в области размещения объекта исследования на генераторе НГ-11И.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Долгополов А.В., Гаганов В.В., Дроздов И.Ю., Кузьма М.М.* // ВАНТ. Серия: Физика ядерных реакторов. 2021. № 4. С. 127. https://doi.org/10.53403/02054671_2021_4_127
2. *Толченов Ю.М., Чайковский В.Г.* Коронные счетчики медленных нейтронов // ПТЭ. 1963. № 6. С. 5.
3. *Dighe P.M., Prasad D.N., Prasad K.R., Kataria S.K., Athavale S.N., Pappachan A.L., Grover A.K.* // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A. 2003. V. 496. P. 154. https://doi.org/10.1016/S0168-9002(02)01635-2
4. *Mazed D., Mameri S., Ciolini R.* // Radiat. Meas. 2012. V. 47. P. 577. http://dx.doi.org/10.1016/j.radmeas.2012.06.002

5. *Васильев И.А., Джилкибаев Р.М., Хлюстин Д.В.* // ПТЭ. 2020. № 2. С. 13. https://doi.org/10.31857/S0032816220010255
6. *Sato T., Niita K., Matsuda N., Hashimoto S., Iwamoto Y., Noda S., Ogawa T., Nakashima H., Fukahori T., Okumura K., Kai T., Chiba S., Furuta T., Sihver L.* // J. Nucl. Sci. Technol. 2013. V. 50. № 9. P. 913. https://doi.org/10.1080/00223131.2013.814553
7. *Крамер-Агеев Е.А., Трошин В.С., Тихонов Е.Г.* Активационные методы спектрометрии нейтронов. Москва: Атомиздат, 1976.