

ТЕХНИКА ЯДЕРНОГО
ЭКСПЕРИМЕНТА

УДК 539.1.03

ИССЛЕДОВАНИЕ ДЕТЕКТОРА НЕЙТРОНОВ
РАДИАЦИОННОГО МОНИТОРА

© 2022 г. Я. В. Лужанчук^{a,*}

^a ВНИИ автоматики им. Н.Л. Духова
Россия, 127055, Москва, Сущевская ул., 22

*e-mail: Luzhanchuk@mail.ru

Поступила в редакцию 24.01.2022 г.

После доработки 31.01.2022 г.

Принята к публикации 01.02.2022 г.

Представлены результаты исследований эффективности регистрации нейтронов детектора на основе ³He-счетчиков в приборах радиационного мониторинга. Рассмотрены факторы, влияющие на эффективность регистрации нейтронов. Показана возможность оптимизации детектора с точки зрения отношения полезного сигнала к фону.

DOI: 10.31857/S0032816222040061

ВВЕДЕНИЕ

Принцип работы радиационного монитора основан на регистрации γ - и n -излучения ядерных материалов с последующей обработкой результатов измерений и принятием решения о значимом превышении полученных результатов над уровнем фона. Поток нейтронов, создаваемый ядерными материалами, очень мал и составляет, например, для плутония $60 \text{ (г} \cdot \text{с)}^{-1}$ [1]. Для обнаружения меньшего количества ядерных материалов необходимо, чтобы нейтронный фон естественного излучения был как можно меньше, а полезный сигнал – как можно больше.

В работе рассмотрено влияние конструкции замедлителя на эффективность пропорциональных ³He-счетчиков с полиэтиленовым замедлителем. Показана возможность повышения отношения полезного сигнала от ядерного материала к фону естественного излучения за счет отличия в энергетическом спектре.

ВЛИЯНИЕ ЗАМЕДЛИТЕЛЯ
НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ РЕГИСТРАЦИИ
НЕЙТРОНОВ

Эффективность регистрации ϵ определяется отношением числа отсчетов, зарегистрированных детектором, к количеству излученных нейтронов ядерным материалом. Эффективность регистрации нейтронов ³He-счетчиками растет с уменьшением энергии нейтронов и для тепловых нейтронов составляет 80%. Регистрация нейтронов в счетчике проходит по реакции: ${}^3\text{He} + n \rightarrow$

$\rightarrow {}^3\text{H} + p + 760 \text{ кэВ}$, сечение которой для тепловых нейтронов равно 5300 б. Таким образом, расположение полиэтиленового замедлителя может существенно влиять на эффективность регистрации.

В данной работе с помощью метода Монте-Карло и данных, приведенных в работе [2], проведены расчеты для детектора нейтронного излучения на основе пропорционального ³He-счетчика, помещенного в замедлитель. Счетчик наполнен ³He под давлением 4 атм и имеет размеры $\varnothing 30 \times 320$ мм. Полиэтилен имеет длину $b = 320$ мм, ширину $a = 100$ мм и толщину, складывающуюся из двух размеров h_1 и h_2 , мм, относительно центра счетчика. Источник нейтронов ²⁵²Cf размещен на расстоянии $r = 500$ мм от центра детектора на линии, перпендикулярной к ³He-счетчику (рис. 1). Для расчетов был использован спектр деления Уатта со средней энергией нейтронов 2.306 МэВ:

$$f(E) = 0.30033e^{-E/1.025} \text{sh}(\sqrt{2.926E}), \quad (1)$$

где E , МэВ – энергия нейтронов.

Результаты расчета представлены на рис. 2. Статистическая погрешность эффективности регистрации составила <1%. Толщина полиэтилена отсчитывалась от центра счетчика вверх h_1 и вниз h_2 . Наиболее высокую эффективность регистрации обеспечивали слои полиэтилена, один из которых, толщиной 60 мм, установлен перед ³He-счетчиком, а второй, толщиной 80 мм, – за ним. При заданной толщине полиэтилена, находяще-

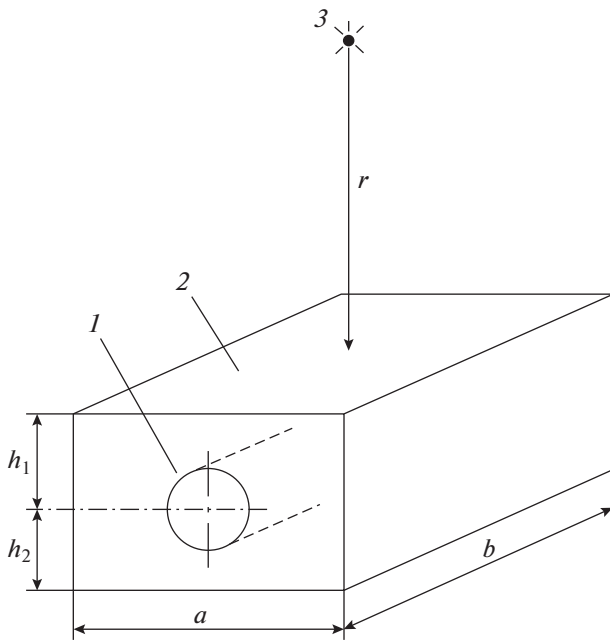


Рис. 1. Схема измерений нейтронного излучения. 1 – счетчик нейтронов, заполненный ^3He ; 2 – полиэтилен; 3 – источник нейтронов.

гося за счетчиком, с увеличением толщины полиэтилена перед счетчиком эффективность регистрации сначала увеличивается, а затем снижается, что связано с захватом нейтронов водородом.

При заданной толщине полиэтилена перед счетчиком с увеличением толщины полиэтилена за счетчиком эффективность регистрации приближается к асимптотическому значению. Этот эффект объясняется отражением нейтронов от полиэтилена, находящегося за счетчиком.

СНИЖЕНИЕ ФОНА ЕСТЕСТВЕННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Основными источниками нейтронного излучения на поверхности Земли являются вторичное космическое излучение и земная кора. Экспериментальные данные, полученные сотрудниками НИИЯФ МГУ в Москве на Воробьевых горах, в здании физического факультета Московского университета, на высоте порядка 20 м, показывают, что потоки нейтронов с энергией не более 0.45 эВ (70%) достигают значений до $2 \cdot 10^{-3} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ [3]. Учитывая этот факт, представляется возможным снизить естественный фон, используя кадмиевый фильтр. Последний обеспечит снижение эффективности регистрации падающих нейтронов всех энергий, но больший эффект будет достигнут для нейтронов более низких энергий – фоновых нейтронов космического излучения и земной коры.

На рис. 3 представлена зависимость эффективности регистрации от энергии нейтронов для кадмиевых фильтров разной толщины. Для расчетов использована геометрия эксперимента,

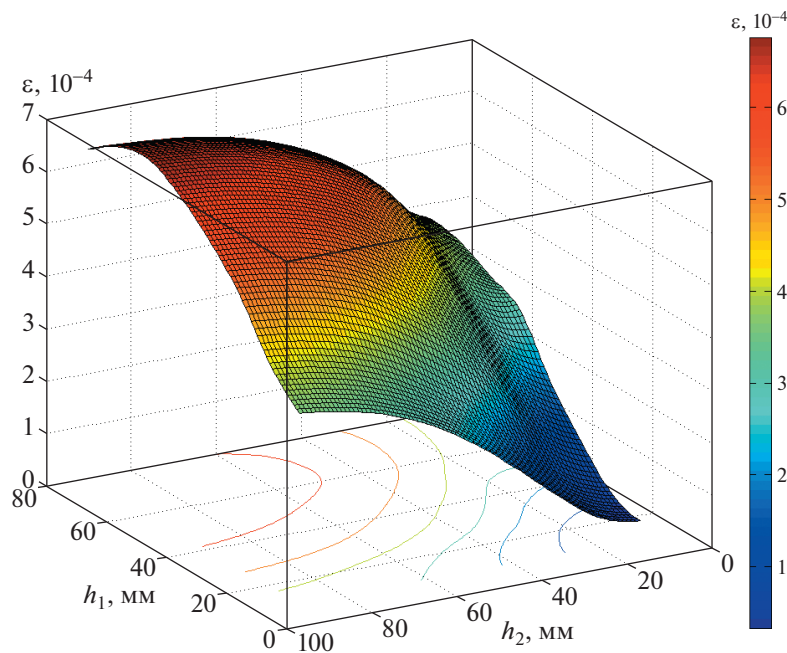


Рис. 2. Зависимость эффективности регистрации ϵ детектора нейтронов от толщины полиэтилена относительно центра счетчика сверху h_1 и снизу h_2 .

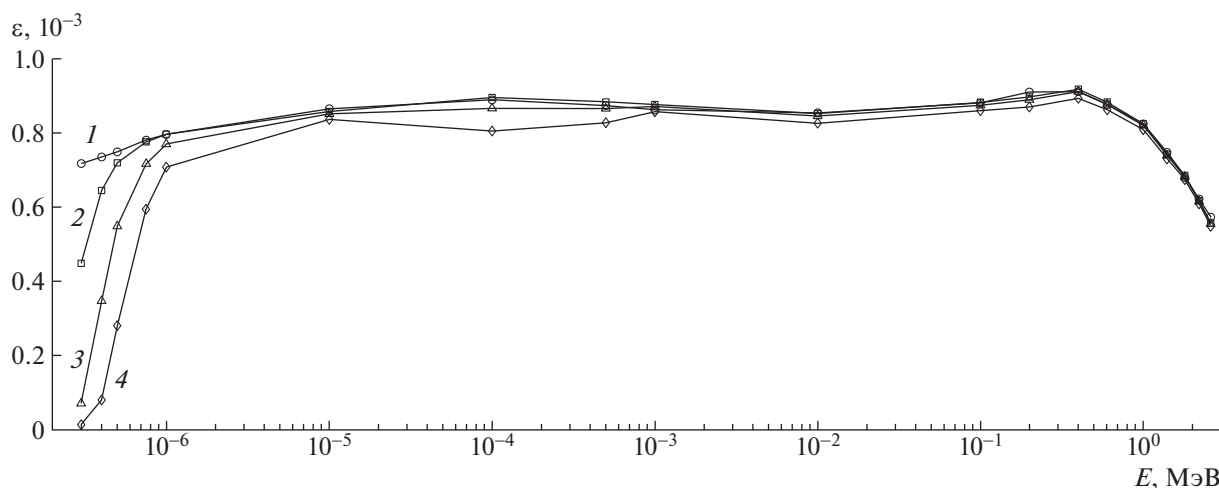


Рис. 3. Зависимость эффективности регистрации детектора от энергии нейтронов при толщине кадмиевого фильтра: 0 (1), 0.1 (2), 0.5 (3), 1.5 мм (4).

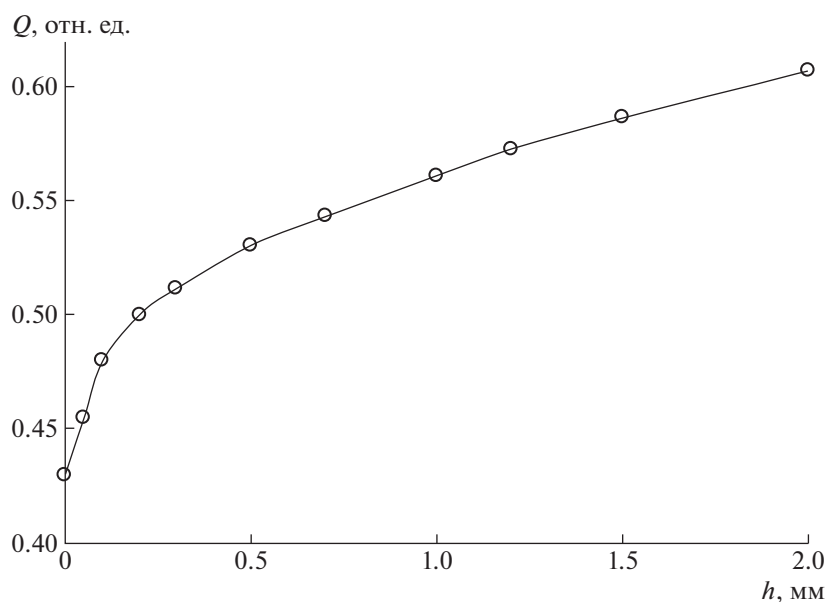


Рис. 4. Зависимость коэффициента качества Q от толщины кадмиевого фильтра h .

представленная на рис. 1, с добавлением кадмиевого фильтра размером 320×100 мм, размещенного на верхней части полиэтиленового замедлителя. Результаты расчета показали, что при использовании кадмиевого фильтра эффективность регистрации падающих нейтронов с энергией до 1 эВ снижается значительно, а с большей энергией — незначительно. Спад эффективности в области энергий более 0.5 МэВ обусловлен недостаточным количеством замедлителя.

Для выяснения суммарного эффекта фильтрации фоновых нейтронов проведен расчет коэффициента качества $Q = N/\sqrt{N_{\text{ф}}}$, который показывает

превышение полезного сигнала от источника N над фоном $N_{\text{ф}}$. В качестве источника фонового излучения было использовано распределение Максвелла со средней энергией нейтронов 0.75 эВ, для источника нейтронов ^{252}Cf — спектр деления Уатта со средней энергией нейтронов 2.306 МэВ.

Результаты расчета позволили установить, что добавление кадмиевого фильтра позволяет в разы уменьшить фон естественного излучения при снижении полезного сигнала на единицы процентов (рис. 4). Например, для кадмиевого фильтра толщиной 1 мм фон естественного излучения

Таблица 1. Порог обнаружения нейтронов детектором

	Без фильтра		С фильтром	
	Фон, с ⁻¹	0.09	0.13*	0.06
Порог обнаружения ²³⁹ Pu, г	97	47*	83	37*

* В детекторе установлено два ³He-счетчика

уменьшается в 1.76 раза при снижении полезного сигнала на 2%.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ

Для измерений использовали детектор нейтронного излучения на основе пропорциональных ³He-счетчиков, помещенных в замедлитель. Измерения проводили как с использованием кадмиевого фильтра толщиной 1 мм, который размещали со всех сторон детектора, так и без него. Порог обнаружения определялся измерением скоростей счета фона и сигнала с фоном. Под порогом обнаружения понимают минимальную массу ядерного материала, которую способен обнаружить радиационный монитор с вероятностью 0.5 и доверительной вероятностью 0.95 [4]. Скорость счета сигнала с фоном определялась расположением источника нейтронов ²⁵²Cf на расстоянии 50 см от эффективного центра детектора. Результаты измерений фона и порога обнаружения представлены в табл. 1.

Анализ полученных результатов показал, что применение кадмиевого фильтра позволяет уменьшить фон естественного излучения и, как след-

ствие, снизить порог обнаружения ядерного материала.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты исследования позволили установить оптимальную толщину полиэтилена, при которой обеспечивается высокая эффективность регистрации ядерных материалов, она составила 60 мм перед ³He-счетчиком и 80 мм за ним. Было установлено, что применение кадмиевого фильтра позволяет снизить фон естественного излучения и порог обнаружения. С увеличением количества ³He-счетчиков эффект кадмиевого фильтра становится существеннее, например, добавление кадмиевого фильтра толщиной 1 мм позволяет снизить порог обнаружения ядерного материала на 17% для одного ³He-счетчика и на 27% – для двух.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Бойко В.И., Силаев М.Е.* Методы и приборы для измерения ядерных материалов и других радиоактивных материалов. М.: МНТЦ Ответственная наука, 2011.
2. *Райли Д., Энслин Н., Смит Х., мл. Крайнер С.* Пассивный неразрушающий анализ ядерных материалов / Пер. с англ. ВНИИА. М.: Бином, 2000. С. 431.
3. *Кадиллин В.В., Рябева Е.В., Самосадный В.Т.* Прикладная нейтронная физика: учебное пособие. М.: НИЯУ МИФИ, 2011. С. 14.
4. ГОСТ Р 51635-2000. Мониторы радиационные ядерных материалов. Общие технические условия. М.: ИПК Издательство стандартов, 2000.