

УДК 539.1.074.825

## СРАВНЕНИЕ ПОТОКОВ НЕЙТРОНОВ, ИЗМЕРЕННЫХ С ПОМОЩЬЮ $^3\text{He}$ -ПРОПОРЦИОНАЛЬНЫХ ГАЗОВЫХ ДЕТЕКТОРОВ И РАССЧИТАННЫХ С ПОМОЩЬЮ ПАКЕТА PHITS

© 2020 г. Л. А. Аксельрод<sup>1</sup>, С. Е. Белов<sup>2</sup>, Г. П. Диденко<sup>1</sup>, В. Г. Зиновьев<sup>1</sup>,  
К. В. Ершов<sup>1, \*</sup>, И. А. Митропольский<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Федеральное государственное бюджетное учреждение “Петербургский институт ядерной физики имени Б.П. Константинова Национального исследовательского центра “Курчатовский институт”, Гатчина, Россия

<sup>2</sup>Открытое акционерное общество “Радиевый институт имени В.Г. Хлопина”, Санкт-Петербург, Россия

\*E-mail: [ershov\\_kv@pnpi.nrcki.ru](mailto:ershov_kv@pnpi.nrcki.ru)

Поступила в редакцию 02.03.2020 г.

После доработки 15.04.2020 г.

Принята к публикации 27.04.2020 г.

Выполнены расчеты и измерения для системы, состоящей из Pu-Be источника, газового детектора и различных замедлителей. Получено удовлетворительное согласие между расчетными и экспериментальными нейтронными потоками, таким образом, подтверждено соответствие расчетов программного пакета PHITS для моделирования переноса нейтронов. Используемая экспериментальная установка не позволила сделать вывод о спектре источника. В ходе расчетов было обнаружено, что концентрация бора в поглотителе имеет оптимальное значение.

DOI: 10.31857/S0367676520080050

### ВВЕДЕНИЕ

При разработке системы радиационной защиты и замедлителя нейтронов для Pu-Be-источника нейтронов необходимо знать его спектр. Экспериментальные спектры таких источников приводятся во многих работах (см. [1, 2]) и всегда несколько отличаются друг от друга. Источники имеют непрерывный нейтронный спектр от примерно 1 кэВ до 10.5 МэВ, нейтроны излучаются в 4π-геометрии, а присутствие вокруг измерительной аппаратуры, контейнера, мебели, строительных конструкций (стен, перекрытий) существенно искажает спектр. Выходом из такой ситуации является времяпролетная методика, которая позволяет регистрировать нейтроны селективно, как по энергиям, так и по направлению, но в нашем распоряжении такой аппаратуры не было.

Поток нейтронов от радиоактивного источника зависит от энергии первичных альфа-частиц, количества примесей, размера зерен диоксида плутония и других технологических факторов. Моделирование Pu-Be-источника было выполнено в [3] в соответствии с заводской спецификацией. Для расчетов использовалась программа PHITS версии 3.10 [4]. PHITS – это программный пакет для моделирования переноса заряженных частиц, нейтронов, гамма-квантов и тяжелых ионов методом Монте-Карло. Ядро пакета ис-

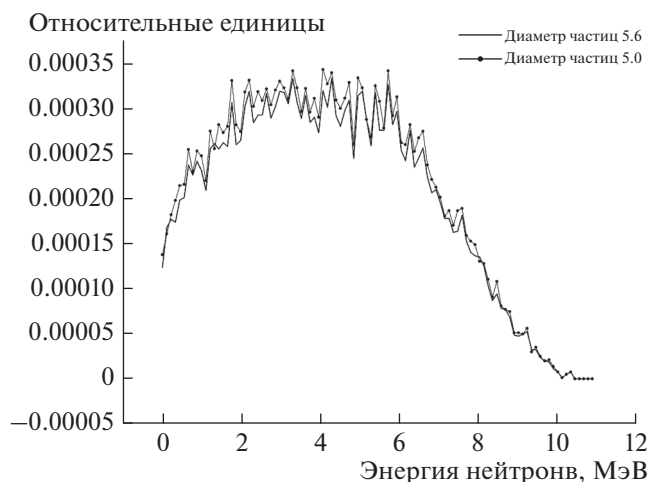
пользует код NMTC/JAM. Характер расчетного спектра, так же зависит от размера зерен диоксида плутония (рис. 1). В данной работе ставилось две задачи. Во-первых, тестирование кода PHITS, который еще не очень хорошо известен в России. Вторая цель заключалась в определении экспериментального спектра источника Pu-Be и утверждении предыдущего расчета. Расчетным путем была обнаружена зависимость количества частиц, регистрируемых детектором, от концентрации бора в поглотителе. Это обсуждается ниже в части 3.

### 1. ЭКСПЕРИМЕНТ

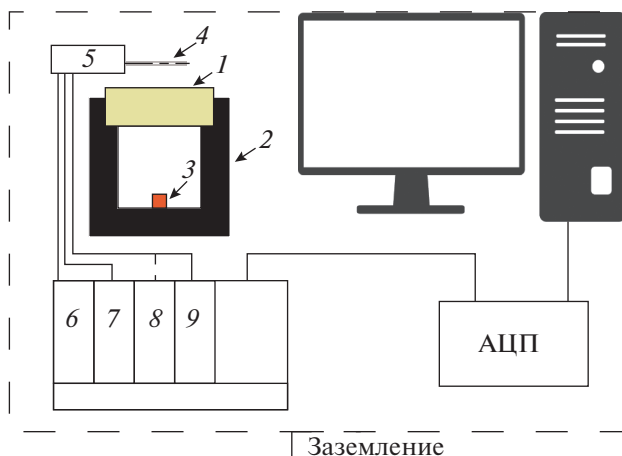
#### 1.1. Экспериментальное оборудование

Для проверки правильности моделирования использовался нейтронный спектрометр с газонаполненным пропорциональным детектором СНМ-50. Счетчик СНМ-50 предназначен для регистрации медленных нейтронов, поэтому для снижения энергии нейтронов использовались различные замедлители (полиэтиленовые листы и С-профили).

Стенд состоял из контейнера, изготовленного из борированного полиэтилена, но вместо обычной крышки мы использовали различные сочетания “чистого” и борированного полиэтилена.



**Рис. 1.** Нейтронный спектр из работы [3]. Сплошная линия – зерна диоксида плутония размером 5.6 мкм, линия с точками – зерна диоксида плутония размером 5.0 мкм.



**Рис. 2.** Экспериментальная установка. 1 – термоллизатор, 2 – контейнер, 3 – источник, 4 – счетчик СНМ-50, 5 – предусилитель, 6 – низковольтное питание, 7 – высоковольтное питание, 8 – цифровой счетчик, 9 – спектрометрический усилитель.

Электронные устройства состояли из счетчика SNM-50 (пропорциональный детектор, заполненный  $^3\text{He}$ ), зарядо-чувствительный предусилитель, источник высокого напряжения, спектрометрический усилитель, цифровой счетчик, все в стандарте САМАС. Крейт САМАС использовался для питания предусилителя. Для амплитудного анализа и накопления данных использовался АЦП/ВМТ RA161.15 (производства PNPi), связанный по интерфейсу USB с компьютером.

Счетчик SNM-50 заполняется двумя газами:  $^3\text{He}$  (7 бар) и Ar (3 бар). Счетчик представляет собой цилиндр диаметром 12 мм и высотой 122 мм. Эффективность регистрации детектора составляет 59% при 25 мэВ [5].

Pu-Be-источник представляет собой стальной цилиндр высотой  $H = 22$  мм и диаметром  $D = 18$  мм. Внутри находится цилиндрическая камера высотой  $h = 10.2$  мм и диаметром  $d = 10$  мм, заполненная спрессованной порошковой смесью природного Be и диоксида  $^{238}\text{Pu}$ . Источник имел активность  $2.4 \cdot 10^{11}$  Бк (по альфа-распаду) и давал изотропный поток  $10^7$  нейтронов в секунду в момент изготовления (за 2 года до нашего эксперимента).

### 1.2. Измерения

Было проведено несколько экспериментов с различными конфигурациями термоллизаторов. Опишем некоторые из них. Мы использовали С-образные элементы сборной защиты с маркировкой С3 и С0, борированный полиэтиленовый лист. С3 содержит 3.5% бора, С0 не содержит бора. Из блоков С0 и С3 было смонтировано два

блока  $300 \times 300 \times 80$  мм, размещенных на месте стандартной крышки контейнера.

В данной работе мы рассмотрим следующую геометрическую конфигурацию:

- 1) детектор находится на пяти различных расстояниях от крышки С0;
- 2) детектор находится на расстоянии 92 мм от крышки С3;
- 3) между крышкой С3 и детектором помещен блок из С0;
- 4) крышка отсутствует;
- 5) борированный полиэтиленовый лист помещают между термоллизатором и детектором.

Мы записали амплитудные спектры для всех измерений. Время экспозиции было одинаковым во всех экспериментах, мы контролировали скорость счета до и после измерений. Резких сдвигов в скорости счета мы не наблюдали. Все амплитудные спектры, полученные в результате, были идентичны и отличались только амплитудой, форма спектров не менялась. Для определения фона мы помещали полиэтиленовые листы между источником и детектором до тех пор, пока скорость счета не перестала меняться. Соответствующее число мы приняли в качестве фона. Поскольку единственным значимым параметром измерений оставалась скорость счета, мы повторили некоторые эксперименты с цифровым счетчиком (без анализатора импульсов).

## 2. ВЫЧИСЛЕНИЯ

Окончательно расчет производился в системе кода PhiTs версии 3.10. Была описана геометрия соответствующего экспериментального стенда.

**Таблица 1.** Сравнительная таблица расчетных данных и экспериментальных результатов

Термолизатор	Расстояние	Счет эксп.	Счет выч.
С0 крышка	332	1169	1757
	420	472	823
	520	211	403
	620	119	237
	720	77	157
С0 над крышкой С3	412	285	438
С3 крышка	412	43	28
Лист борированного полиэтилена	412	90	58
Открытый контейнер	412	149	98

Вычитая значение фона из экспериментальных данных, мы учитывали рассеяние в бетоне стен и на мебели.

Мы поместили в модели цилиндр с размерами, соответствующими размерам счетчика СНМ-50, заполнив его газами, и произвели расчет. Затем убрали его и повторили расчеты еще раз. Мы предположили, что при определенных условиях (неизменном стартовом случайном числе) разность между количествами нейтронов, выходящих из системы во втором и первом случае, равна числу нейтронов, зарегистрированных детектором. Способ, предложенный в руководстве программного пакета, несколько иной, чем мы использовали, но наш путь кажется авторам более “физичным”. Полученное число делится на эффективность детектора и умножается на коэффициент  $F$ , где  $F$  – поправочный коэффициент, учитывающий разность отсчетов АЦП и цифрового счетчика. Для расчета эффективности детектора были использованы данные из [3] и другие результаты<sup>1</sup>. Полную эффективность можно разделить на два фактора. Первый фактор зависит от поперечного сечения реакции  ${}^3\text{He} + n$ , а второй – от эффективности регистрации событий в газе. Полная эффективность регистрации тепловых нейтронов составляет 59% [3]. Из [5] мы знаем, что два СНМ-50, стоящих на нейтронном тепловом пучке один за другим, дают соотношение интенсивности 85 : 15. Таким образом, мы должны умножить вычисленные данные на 0.72 (приблизительно).

Поскольку спектр из работы [3] очень сложный, он был упрощен до двадцати групп, получаемых путем усреднения.

<sup>1</sup> Данные получены в частном сообщении от Г.П. Диденко и Д.С. Ильина.

### 3. РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В эксперименте мы использовали борные и кадмиевые фильтры, чтобы изменять форму амплитудных спектров, но это не удалось. Поэтому мы отказались от сравнения амплитудных спектров пропорционального счетчика и расчетного распределения энергии, а использовали только общую скорость счета импульсов после различных фильтров и замедлителей. Результаты приведены в табл. 1.

Так же были произведены измерения с использованием позиционно-чувствительного  ${}^3\text{He}$ -наполненного детектора производства ПИЯФ (60 × 60 см), как с целью поверки РНITs, так и в рамках подготовки детектора к запуску реактора ПИК. В этих измерениях не удалось добиться контрастного 2-D изображения, которое можно было бы однозначно сравнивать с расчетом (из-за сильного рассеяния нейтронов в помещении и нестабильной работы детектора), хотя качественные результаты моделирования соответствовали наблюдаемым изображениям.

Можно сделать следующие выводы:

- а) соответствие расчета эксперименту удовлетворительное для программ такого типа;
- б) данная экспериментальная установка не подходит для подтверждения распределения энергии из [3].

Полученные расчеты качественно описывают эксперимент, но не удалось получить хорошего количественного согласия. Одна из причин заключается в составе материалов, который в точности не известен и может содержать некоторое количество поглотителя нейтронов, не учтенного в модели. Тем не менее, некоторые данные табл. 1 дают основания для более тщательно исследования соответствия используемого в пакете сечения поглощения бора и экспериментальных результатов.

Таблица 2. Выбор оптимальной концентрации бора для контейнера

Концентр. бора, %	Нейтроны			Гамма
	вылетевшие из системы	поглощ.	прирост числа поглощенных с увеличением концентрации	вылетевшие из системы
1	412229	14785		663975
2	411647	15367	582	663252
3	411574	15440	73	662910
4	411567	15447	7	662886
5	411613	15401	-46	662863
6	411698	15316	-85	662805
7	411826	15188	-128	662862
8	411949	15065	-123	662839
9	412168	14846	-219	662751
10	412359	14655	-191	662717

В ходе расчетов, связанных с моделированием эксперимента, было обнаружено, что число нейтронов, покинувших систему, в зависимости от концентрации бора имеет насыщение, и мы решили это проверить отдельным расчетом. Результаты приведены в табл. 2. Мы можем видеть максимальное поглощение при содержании бора в полиэтилене на уровне 2–4%. Далее число нейтронов, покидающих систему, увеличивается при увеличении концентрации бора, т.е. поглощение уменьшается (за счет нейтронов высоких энергий). Выяснить, имеет ли это физическую причину, или это особенность программного пакета, можно при помощи эксперимента с детектором, позволяющим регистрировать быстрые нейтроны, либо в эксперименте на синхроциклотроне (установка ГНЕЙС), где есть временная отметка начала измерений, и можно использовать время-пролетную методику.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Сопоставление расчетных и экспериментальных данных позволяет сделать следующие выводы: а) использован достаточно надежный способ

моделирования детектора; б) совпадение результатов данного эксперимента и расчетов зависит только от средневзвешенной энергии нейтронов, а не от распределения их по энергиям; в) для подтверждения спектра Pu-Be-источника необходим детектор быстрых нейтронов, и такой эксперимент планируется; г) концентрация бора в защите имеет значение, близкое к оптимальному.

Авторы выражают благодарность за помощь в работе с программным пакетом PhiTs: сотруднику ПИЯФ М.С. Онегину и доктору Т. Фуруте.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Jun I., Mitrofanov I., Litvak M.L. et al. // J. Geophys. Res. Planets. 2013. V. 118. № 11. P. 2400.*
2. *Shvetsov V.N., Dubasov P.V., Golovin D.V. et al. // Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A. 2017. V. 861. P. 1.*
3. *Ершов К.В.* Препринт № 3032. Гатчина: ПИЯФ, 2018.
4. *Sato T., Iwamoto Y., Hashimoto S. et al. // J. Nucl. Sci. Technol. 2018. V. 55. № 6. P. 684.*
5. *Засадыч Ю.В., Прокудин П.П. // ПТЭ. 1980. Т. 5. С. 245.*