

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОТОКА НЕЙТРОНОВ ПРИ ОБЛУЧЕНИИ БЕРИЛЛИЕВОЙ МИШЕНИ ПРОТОНАМИ С ЭНЕРГИЕЙ 21.3 МэВ

© 2022 г. Ю. Е. Титаренко^{1)*}, В. Ф. Батяев¹⁾, В. Ю. Бландинский¹⁾, В. М. Живун¹⁾, М. А. Жигулина¹⁾, А. А. Ковалишин¹⁾, Т. В. Кулевой¹⁾, Б. В. Кутеев¹⁾, В. О. Легостаев¹⁾, С. В. Малиновский¹⁾, К. В. Павлов¹⁾, В. И. Рогов¹⁾, А. Ю. Титаренко¹⁾, Р. С. Халиков¹⁾, В. С. Столбунов¹⁾, Н. А. Коваленко^{1),2)}, А. Р. Мороз²⁾, С. В. Григорьев²⁾, К. А. Павлов²⁾

Поступила в редакцию 08.06.2022 г.; после доработки 08.06.2022 г.; принята к публикации 11.06.2022 г.

Представлены результаты определения плотности потока нейтронов с энергией до 20 МэВ, образовавшихся при облучении Ве толщиной 1.3 мм пучком протонов с энергией 21.3 МэВ. Плотность потока протонов определялась штатными приборами и контролировалась активационным методом с использованием мониторинговых реакций $^{nat}\text{Cu}(p, x)^{62}\text{Zn}$ и $^{nat}\text{Cu}(p, x)^{63}\text{Zn}$, а плотность потока образовавшихся нейтронов определялась с помощью реакций $^{27}\text{Al}(n, p)^{27}\text{Mg}$ и $^{27}\text{Al}(n, \alpha)^{24}\text{Na}$. Спектры протонов и нейтронов в центре экспериментальных образцов рассчитывались по программе RHITS.

DOI: 10.31857/S0044002722060137

1. ВВЕДЕНИЕ

Уникальные свойства нейтронов позволяют использовать их во многих областях исследований от физики и материаловедения до биологии и геологии. К основным таким свойствам, конечно, относятся: электрическая нейтральность, относительно большое время жизни в свободном состоянии, наличие собственного магнитного момента, безвредность нейтронного излучения даже для исследования биологических систем и глубокая проникающая способность нейтронного излучения.

В связи с этим в последнее время все более широкое распространение получают нейтронные методы исследования различного назначения, для которых необходимы соответствующие источники нейтронов. К таким нейтронным источникам относятся источники на основе импульсных линейных ускорителей протонов, в качестве генерирующей мишени в которых может использоваться бериллий, испускающий нейтроны в реакциях типа $^9\text{Be}(p, x)$. Задача, которой посвящена настоящая работа, заключается в определении плотности потока нейтронов в результате облучения Ве-мишени толщиной 1.3 мм протонами с энергией 21.3 МэВ.

2. ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

Схема внешнего канала (ВК) линейного ускорителя И-2 НИЦ КИ, выводящего пучок протонов в атмосферу, представлена на рис. 1. Параметры пучка протонов ВПА представлены в табл. 1.

Нейтронопроизводящий модуль (НПМ) расположен в конце внешнего вакуумного канала, по оси пучка протонов на расстоянии 8.5 см от выпускного окна. НПМ включает в себя Ве-мишень диаметром 40 мм и толщиной 1.3 мм, установленную в центре камеры из борированного (5%) полиэтилена (КБП) толщиной 5 см, которая, в свою очередь, окружена свинцовой защитой толщиной также 5 см. Схема камеры и расположение в ней мишени изображены на рис. 2, вид нейтронопроизводящего модуля показан на рис. 3.

Таблица 1. Параметры пучка протонов

Энергия ускоренных протонов	24.6 МэВ
Энергетический разброс частиц	±0.5%
Ток ускоренного пучка в импульсе, до	200 мА
Длительность импульса пучка	2–30 мкс
Средний ток ускоренного пучка, до	5 мкА
Диаметр выпускного окна	85 мм
Частота следования импульсов	0.249 Гц

¹⁾НИЦ “Курчатовский институт”, Москва, Россия.

²⁾НИЦ “Курчатовский институт” — ПИЯФ, Гатчина, Россия.

*E-mail: Yury.Titarenko@itep.ru

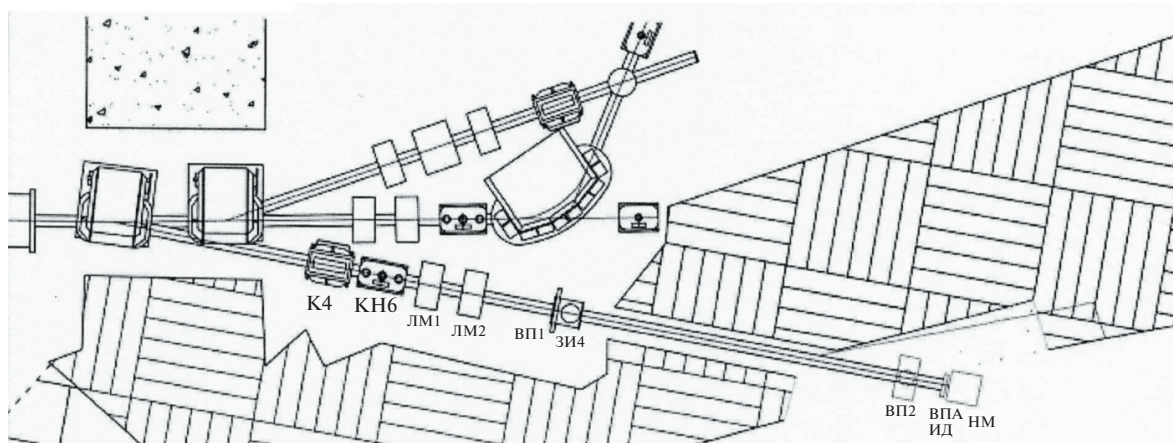


Рис. 1. Схема внешнего канала линейного ускорителя И-2: К4 — электромагнитный корректор; КН6 — камера наблюдения; ЛМ1 — 1-я малая линза; ЛМ2 — 2-я малая линза; ВП1 — вакуумный пост 1 (форвакуумный насос); ЗИ4 — затвор вакуумный; ВП2 — вакуумный пост 2 (высоковакуумный магнетронный насос); ВПА — вывод пучка протонов в атмосферу; ИД — индукционный датчик; НМ — нейтронопроизводящий модуль.

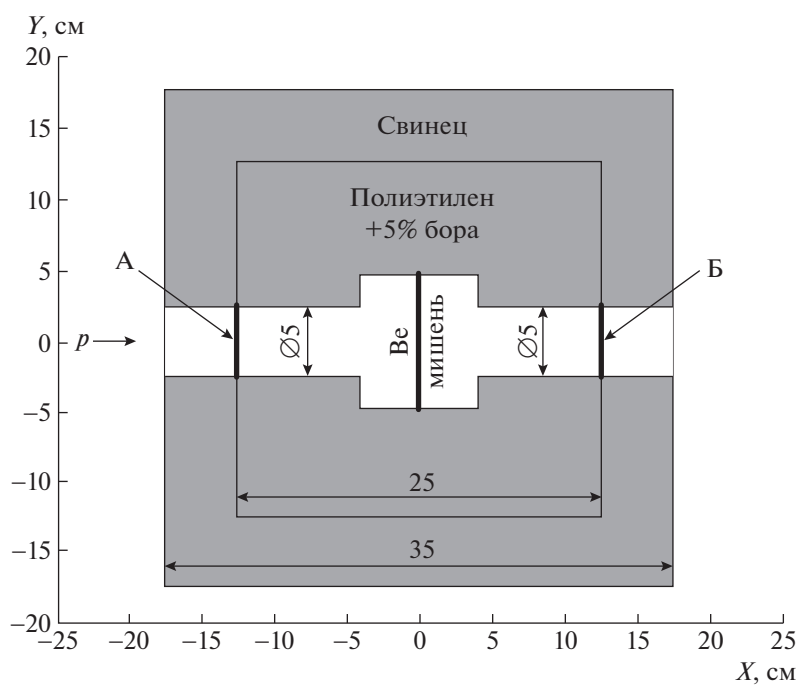


Рис. 2. Чертеж НМ с Rb-защитой. Буквы А и Б показывают расположение активационных мониторов, параметры которых представлены в табл. 6.

3. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭНЕРГИИ ПРОТОНОВ В СИ-МОНИТОРЕ И СПЕКТРА НЕЙТРОНОВ В ОБЛАСТИ РАСПОЛОЖЕНИЯ А1-МИШЕНИ

Активационный Си-монитор диаметром 5 см с помощью липкой ленты помещался во входном отверстии НМ. При определении энергии протонов в объеме активационного монитора и на входе в Ве-мишень использовались следующие исходные данные:

выпускное окно ВК — А1-фольга толщиной 0.5 мм;

толщина воздушного промежутка от окна ВК до активационного Си-монитора — 85.0 мм;

толщина Си-монитора — 0.1 мм;

толщина воздушного промежутка от Си-монитора до Ве-мишени — 122.5 мм.

Таблицы 2 и 3 показывают результаты вычислений с помощью программы SRIM [1] пробегов

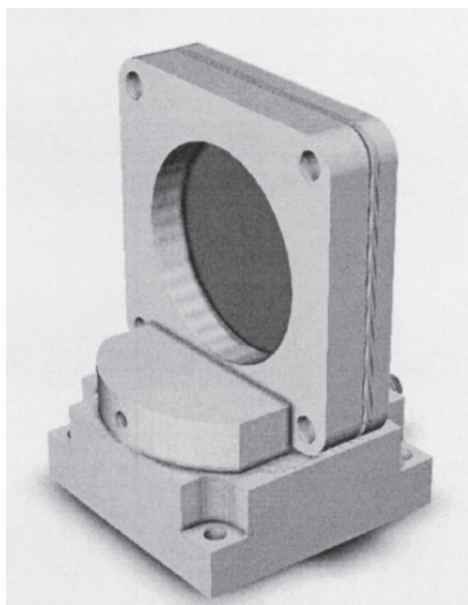


Рис. 3. 3D модель нейтронопроизводящего модуля.

протонов на граничных точках вышеуказанных материалов.

Спектры протонов и нейтронов в Cu- и Al-

Таблица 2. Граничные энергии протонного пучка при выводе из ускорителя И-2 при использовании Cu-монитора

Номер слоя, i	Энергия протонов на входе в слой E_i , МэВ	Материал слоя	Толщина слоя, мкм	Энергия на выходе из слоя E_i , МэВ
1	24.60	Al	500	22.24
2	22.24	Воздух	85 000	21.96
3	21.96	Cu	100	20.56

Таблица 3. Граничные энергии протонного пучка при выводе из ускорителя И-2 при использовании Al-монитора

Номер слоя, i	Энергия протонов на входе в слой E_i , МэВ	Материал слоя	Толщина слоя, мкм	Энергия на выходе из слоя E_i , МэВ
1	24.60	Al	500	22.26
2	22.26	Воздух	209 350	21.05
3	21.05	Be	1300	15.48
4	15.48	Воздух	124 350	14.90
5	14.90	Al	138	13.96

мониторах рассчитывались с использованием программы RHITS [2]. Спектр нейтронов от реакции ${}^9\text{Be}(p, x)$ в Al-мониторе представлен на рис. 4. Кроме спектра нейтронов, также рассчитывались скорости реакций ${}^{27}\text{Al}(n, p){}^{27}\text{Mg}$ и ${}^{27}\text{Al}(n, \alpha){}^{24}\text{Na}$, файлы сечений этих реакций были взяты из библиотеки ENDF/B-VIII.0.

В этом случае средние сечения по расчетному спектру нейтронов можно представить в виде

$$\bar{\sigma} = \frac{\int_{E_{\text{пор}}}^{20 \text{ МэВ}} \sigma(E)\Phi(E)dE}{\int_{E_{\text{пор}}}^{20 \text{ МэВ}} \Phi(E)dE}, \quad (1)$$

где $\bar{\sigma}$ — значение среднего сечения, усредненного по спектру нейтронов; $\Phi(E)$ — спектр нейтронов, представленный на рис. 4; $\sigma(E)$ — энергетическая зависимость сечения пороговых реакций, представленная на рис. 5 и 6. Для демонстрации динамики сечений при энергиях выше 20 МэВ, для которых информация в библиотеке ENDF/B отсутствует, на рис. 5 и 6 дополнительно представлены сечения из библиотеки TENDL-2019.

Значения средних сечений нейтронных реакций, оцененных по формуле (1), представлены в табл. 4.

4. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЗНАЧЕНИЯ СЕЧЕНИЯ МОНИТОРНОЙ РЕАКЦИИ

С использованием базы данных по экспериментально измеренным сечениям различных ядерных реакций EXFOR были составлены компиляции имеющихся данных по реакциям ${}^{\text{nat}}\text{Cu}(p, x){}^{62}\text{Zn}$ и ${}^{\text{nat}}\text{Cu}(p, x){}^{63}\text{Zn}$ [5], которые представлены на рис. 7 и 8. Таблица 5 содержит результаты оценки сечений мониторинговых реакций при указанных в табл. 2 энергиях протонов.

5. ПАРАМЕТРЫ ОБЛУЧЕНИЙ Cu- И Al-МОНИТОРОВ, ОБРАБОТКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ

Облучения Cu- и Al-мониторов состояли из двух сеансов, параметры которых представлены

Таблица 4. Результаты определения сечений ${}^{27}\text{Al}(n, p){}^{27}\text{Mg}$, ${}^{27}\text{Al}(n, \alpha){}^{24}\text{Na}$ реакций

Способ оценки	Значение среднего сечения ${}^{27}\text{Al}(n, p){}^{27}\text{Mg}$, мбн	Значение среднего сечения ${}^{27}\text{Al}(n, \alpha){}^{24}\text{Na}$, мбн
RHITS	12.2 ± 1.2	6.8 ± 0.9

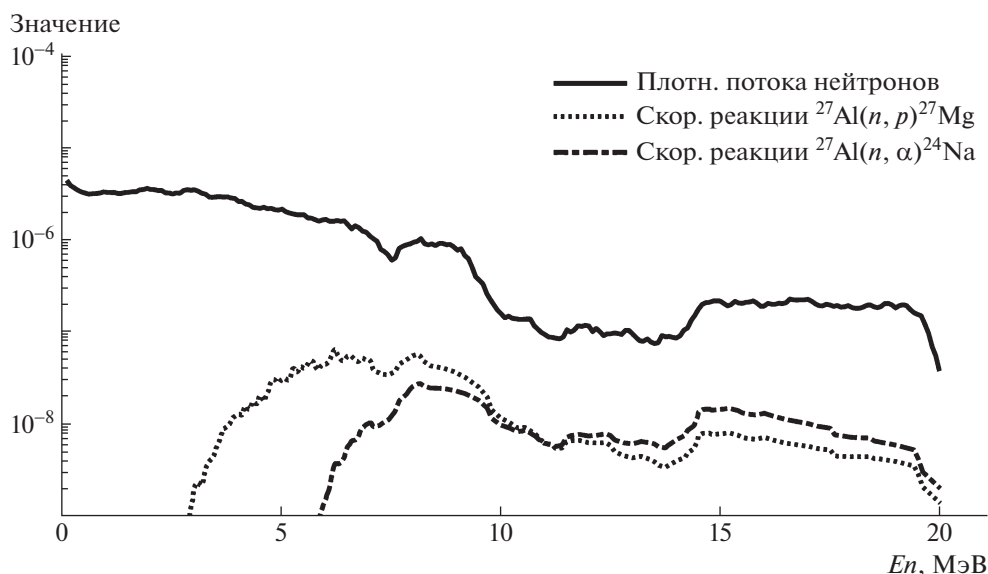


Рис. 4. Результаты моделирования с использованием программы RHITS спектров нейтронов в области расположения Al-монитора и скоростей $^{27}\text{Al}(n, p)^{27}\text{Mg}$ и $^{27}\text{Al}(n, \alpha)^{24}\text{Na}$ реакций. Значения плотности потока представлены с размерностью $(n/p/\text{см}^2/\text{МэВ})$, значения скоростей реакций — $(10^{-24}/p/\text{МэВ})$.

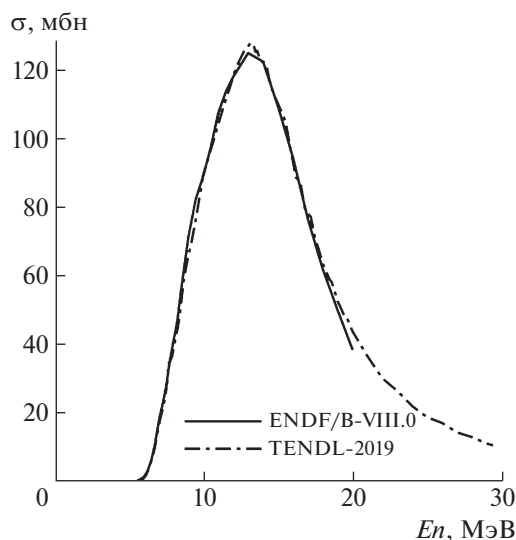


Рис. 5. Файлы сечений реакции $^{27}\text{Al}(n, \alpha)^{24}\text{Na}$, представленные в библиотеках ENDF/B-VIII.0 [3] и TENDL-2019 [4].

Таблица 5. Результаты определения сечений $^{nat}\text{Cu}(p, x)^{62}\text{Zn}$, $^{nat}\text{Cu}(p, x)^{63}\text{Zn}$ реакций

Способ оценки	Средняя энергия протонов в Си-мониторе, МэВ	Значение мониторингового сечения $^{nat}\text{Cu}(p, x)^{62}\text{Zn}$, мбн	Значение мониторингового сечения $^{nat}\text{Cu}(p, x)^{63}\text{Zn}$, мбн
SRIM	21.3	60.4 ± 5.8	35.8 ± 6.3

в табл. 6. В обоих сеансах диаметры мониторов составляли 50 мм, а длительность сеансов составляла 20 мин при частоте следования протонных импульсов 0.249 Гц (по 400 протонных импульсов в обоих сеансах).

Спектрометры, используемые для измерения облученных Си- и Al-мониторов, представляли собой два идентичных комплекта на базе коаксиальных HPGe-детекторов GC2518 и цифровых блоков DSA 1000.

Для выполнения экспериментов были определены их рабочие характеристики и проведены калибровки эффективности регистрации γ -квантов в

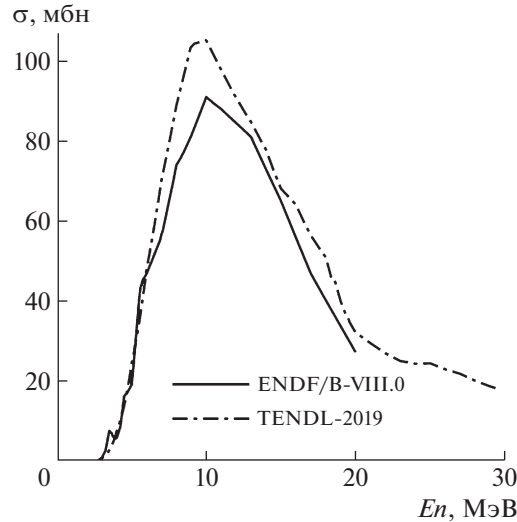


Рис. 6. Файлы сечений реакции $^{27}\text{Al}(n, p)^{27}\text{Mg}$, представленные в библиотеках ENDF/B-VIII.0 и TENDL-2019.

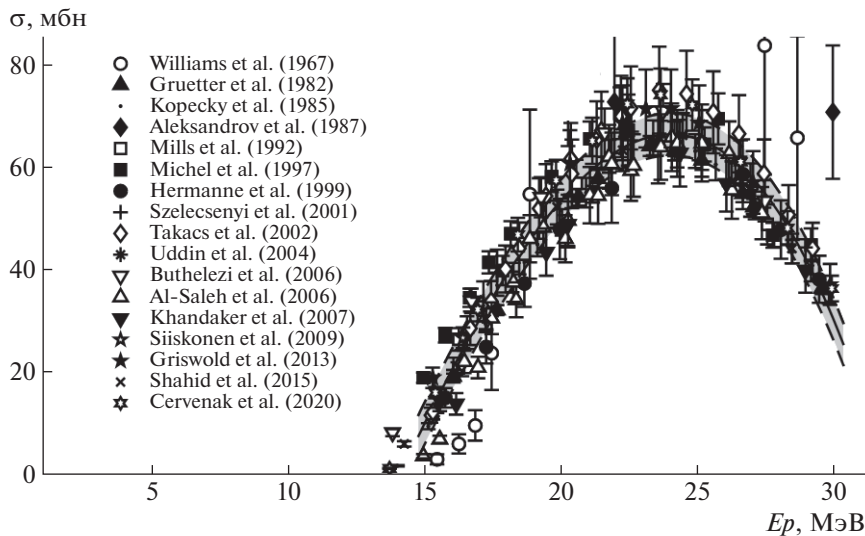


Рис. 7. Компильция базы данных EXFOR экспериментальных работ по измерению сечений мониторинг реакции $^{\text{nat}}\text{Cu}(p, x)^{62}\text{Zn}$.

интервале энергий от 0.05 до 3 МэВ в диапазоне расстояний источник–детектор от 40 до 1325 мм. Пример полученной калибровки представлен в [6].

Обработка первичных γ -спектров облученных исследуемых и мониторинговых образцов во всех экспериментах осуществлялась с помощью пакета программ GENIE-2000 [7], обеспечивающего возможность после пакетной обработки применить интерактивную подгонку γ -спектров с заведомо большим количеством неразрешенных мультиплетов. Примеры измеренных γ -спектров представлены на рис. 9 и 10.

С использованием значений сечений мониторинговых реакций $^{\text{nat}}\text{Cu}(p, x)^{62}\text{Zn}$ и $^{\text{nat}}\text{Cu}(p, x)^{63}\text{Zn}$, представленных в табл. 4, плотность потока прото-

Таблица 6. Параметры облучений Cu- и Al-мониторов

№ сеанса	Цели сеанса	Позиция монитора на рис. 2	Материал монитора	Вес монитора, мг
1	Определение плотности потока протонов на входе в НПМ	А	Cu	1731.4
2	Определение плотности потока нейтронов на выходе из НПМ	Б	Al	738.2

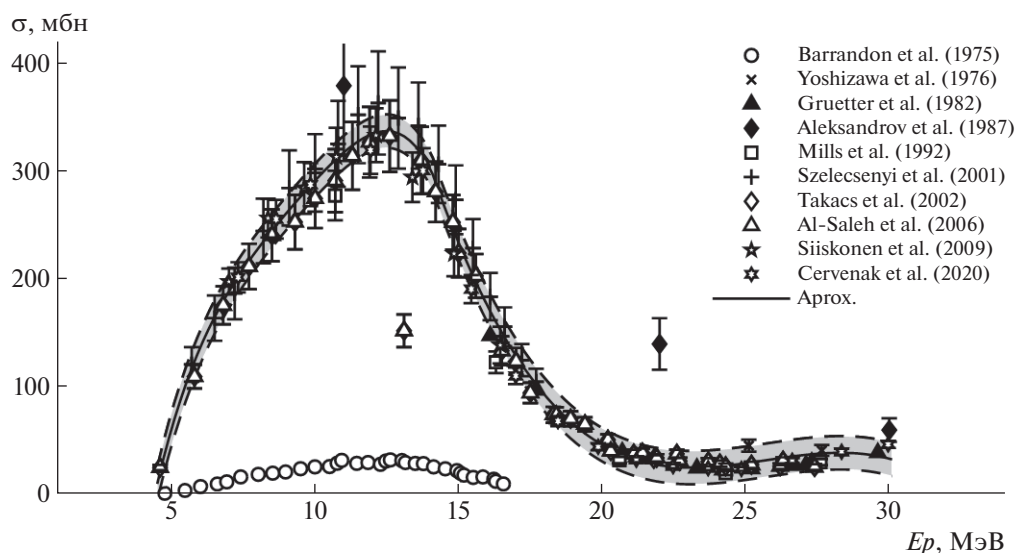


Рис. 8. Компиляция базы данных EXFOR экспериментальных работ по измерению сечений мониторинжной реакции ${}^{\text{nat}}\text{Cu}(p, x){}^{63}\text{Zn}$.

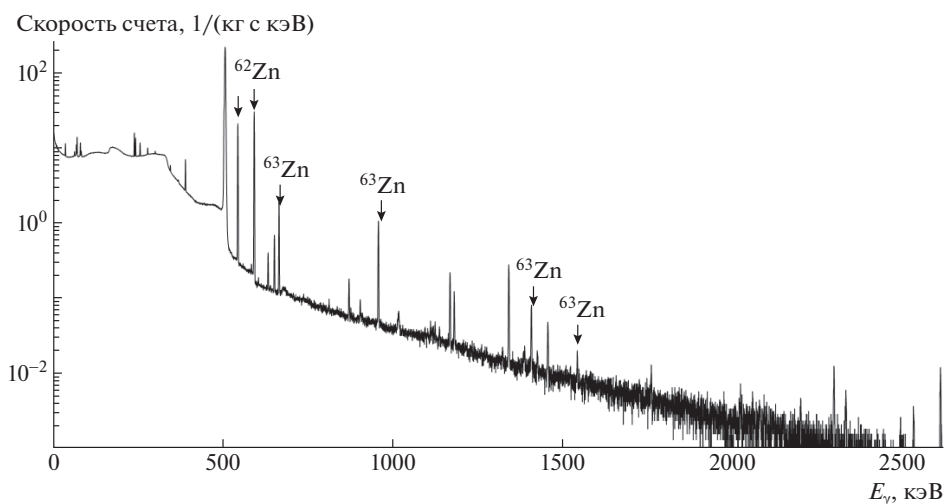


Рис. 9. Спектр гамма-излучения Cu-монитора.

нов и ее погрешность определяются по формулам:

$$\Phi = \frac{RR}{\sigma}, \quad (2)$$

$$\frac{\Delta\Phi}{\Phi} = \sqrt{\left(\frac{\Delta RR}{RR}\right)^2 + \left(\frac{\Delta\sigma}{\sigma}\right)^2}, \quad (3)$$

где RR — скорость мониторинжной реакции, σ — сечение используемой мониторинжной реакции.

Скорость мониторинжной реакции RR и ее погрешность ΔRR , в свою очередь, определяются с использованием гамма-спектрометра по формулам:

$$RR = \frac{A}{N_{\text{tag}}\eta\varepsilon F}, \quad (4)$$

$$\Delta RR = \sqrt{\left(\frac{\Delta A}{A}\right)^2 + \left(\frac{\Delta\eta}{\eta}\right)^2 + \left(\frac{\Delta\varepsilon}{\varepsilon}\right)^2 + \left(\frac{\Delta N_{\text{tag}}}{N_{\text{tag}}}\right)^2 + \left(\frac{\Delta F}{F}\right)^2} RR, \quad (5)$$

Таблица 7. Ядерно-физические характеристики ^{62}Zn , ^{63}Zn и ^{27}Mg , ^{24}Na

	Энергия γ -квантов, кэВ	Выход γ -квантов на 100 распадов	Период полурас- пада
^{62}Zn	548.35	15.3 ± 1.4	9.193 ч
^{62}Zn	596.56	26 ± 2	9.193 ч
^{63}Zn	669.62	8.2 ± 0.3	38.47 мин
^{63}Zn	962.06	6.5 ± 0.4	38.47 мин
^{27}Mg	843.76	71.80 ± 0.02	9.458 мин
^{27}Mg	1014.52	28.20 ± 0.02	9.458 мин
^{24}Na	1368.63	99.99	14.997 ч

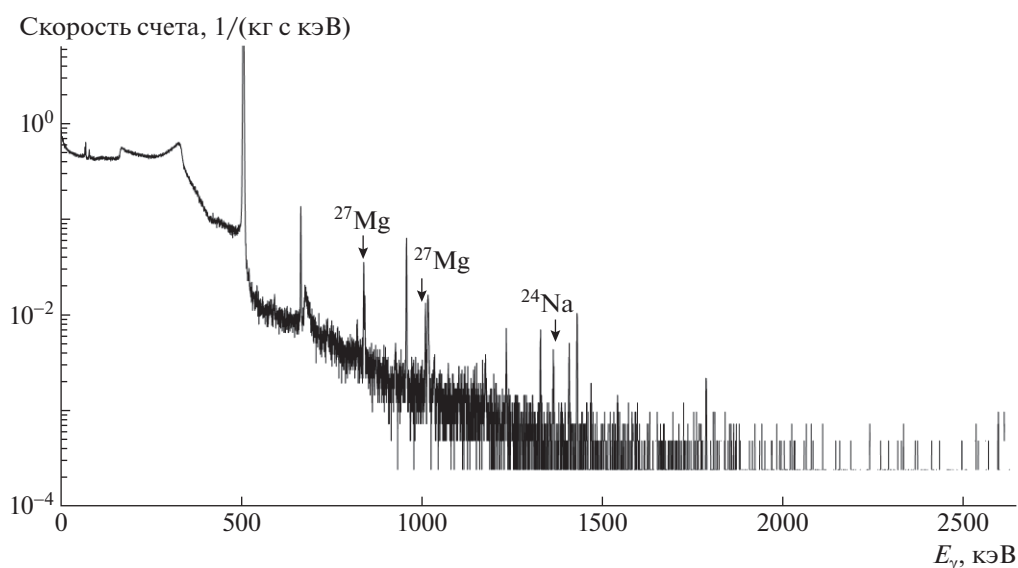


Рис. 10. Спектр гамма-излучения Al-монитора.

где A — скорость счета в пике полного поглощения; N_{tag} — число ядер в мониторе; η — квантовый выход регистрируемых гамма-квантов на один распад продукта мониторинговой реакции; ε — эффективность регистрации спектрометра; F — экспоненциальная функция, учитывающая распад продукта мониторинговой реакции.

Подробное описание процедуры определения скоростей реакции представлено в [6].

Ядерно-физические характеристики продуктов, используемых для расчета потока протонов и нейтронов за все время облучения, представлены в табл. 7 [8].

Итоговые значения скоростей реакций и итоговые значения потоков протонов и нейтронов представлены в табл. 8.

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представленные результаты контроля плотностей потоков протонов и нейтронов с энергией до 20 МэВ позволили определить численное значение плотности потока нейтронов из Ве-мишени с относительной погрешностью $\sim 15\%$. Полученное значение $(7.0 \pm 0.6) \times 10^{-4}$ нейтронов, вылетающих из НПМ, в нормировке на исходный протон примерно в на треть выше значения, полученного по программе RHITS — (5.4×10^{-4}) .

Таблица 8. Значения измеренных скоростей реакций, плотности потока частиц (протоны и нейтроны) и их погрешности

№ сеанса	Продукт реакции	Энергия γ -излучения, кэВ	$RR_i \pm \Delta RR_i$, 1/с	$\overline{RR} \pm \Delta \overline{RR}$, 1/с	$\Phi_i \pm \Delta \Phi_i$, частиц/см ² с	$\overline{\Phi} \pm \Delta \overline{\Phi}$, частиц/см ² с
Протоны						
1	⁶² Zn	548.35	$(1.44 \pm 0.13) \times 10^{-15}$	$(1.419 \pm 0.086) \times 10^{-15}$	$(2.3 \pm 0.2) \times 10^{10}$	$(2.2 \pm 0.3) \times 10^{10}$
	⁶² Zn	596.56	$(1.41 \pm 0.11) \times 10^{-15}$			
	⁶³ Zn	669.62	$(7.59 \pm 0.34) \times 10^{-16}$	$(7.56 \pm 0.28) \times 10^{-16}$	$(2.1 \pm 0.4) \times 10^{10}$	
	⁶³ Zn	962.06	$(7.49 \pm 0.49) \times 10^{-16}$			
Нейтроны						
2	²⁷ Mg	843.76	$(2.091 \pm 0.091) \times 10^{-19}$	$(2.100 \pm 0.072) \times 10^{-19}$	$(1.6 \pm 0.07) \times 10^7$	$(1.6 \pm 0.05) \times 10^7$
	²⁷ Mg	1014.5	$(2.11 \pm 0.12) \times 10^{-19}$			
	²⁴ Na	1368.6	$(1.463 \pm 0.021) \times 10^{-19}$	$(1.463 \pm 0.021) \times 10^{-19}$	$(2.2 \pm 0.06) \times 10^7$	
Отношение $\overline{\Phi}_n/\overline{\Phi}_p$						$(7.0 \pm 0.6) \times 10^{-4}$

Отметим, что образование ²⁷Mg в Al происходит исключительно под воздействием нейтронов, в то время как ²⁴Na может образовываться как под воздействием нейтронов, так и протонов с энергиями ниже 20 МэВ. Поэтому для вычисления плотности потока нейтронов использовалось значение реакции ²⁷Al(*n, p*)²⁷Mg.

В дальнейшем планируется провести работы по измерению спектров нейтронов методом времени пролета. Толщину Ве-мишени предполагается увеличить до 3.0 мм с целью исключения протонов на выходе из НПМ или изготовить комбинированную мишень, состоящую из Ве толщиной 1.3 мм и Cu толщиной ~0.5 мм.

Исследования выполнены при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (РФФИ) в рамках научного проекта № 19-29-02028, а также при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках Соглашения № 075-15-2022-830 от 27 мая 2022 г. (продолжение Соглашения № 075-15-2021-1358 от 12 октября 2021 г.).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. J. F. Ziegler, SRIM-2013, <http://www.srim.org/>

2. T. Sato, Y. Iwamoto, S. Hashimoto, T. Ogawa, T. Furuta, S. Abe, T. Kai, Pi-En Tsai, N. Matsuda, H. Iwase, N. Shigyo, L. Sihver, and K. Niita, J. Nucl. Sci. Tech. **55**, 684 (2018).

3. D. A. Brown, M. B. Chadwick, R. Capote, A. C. Kahler, A. Trkov, M. W. Herman, A. A. Sonzogni, Y. Danon, A. D. Carlson, M. Dunn, D. L. Smith, G. M. Hale, G. Arbanas, R. Arcilla, C. R. Bates, B. Beck, *et al.*, Nucl. Data Sheets **148**, 1 (2018).

4. A. J. Koning, D. Rochman, J.-Ch. Sublet, N. Dzysiuk, M. Fleming, and S. van der Marck, Nucl. Data Sheets **155**, 1 (2019).

5. Experimental Nuclear Reaction Data (EXFOR), <https://www-nds.iaea.org/exfor/>

6. Yu. E. Titarenko, V. F. Batyaev, E. I. Karpikhin, V. M. Zhivun, A. V. Ignatyuk, V. P. Lunev, N. N. Titarenko, Yu. N. Shubin, and V. S. Barashenkov, INDC(CCP)-0447, IAEA (Oct. 2009); <http://www-nds.iaea.org/publications/indc/indc-ccp-0447.pdf>

7. Genie™2000 Gamma Analysis Software, Mirion Technologies (Canberra), Inc.

8. Nuclear Structure & Decay Data (NuDat 2.8); <https://www.nndc.bnl.gov/nudat3/nudat2.jsp>

DETERMINATION OF THE NEUTRON FLUX UNDER IRRADIATION OF THE BERYLLIUM TARGET BY PROTONS WITH ENERGY 21.3 MeV

Yu. E. Titarenko¹⁾, V. F. Batyaev¹⁾, V. Yu. Blandinskiy¹⁾, V. M. Zhivun¹⁾, M. A. Zhigulina¹⁾, A. A. Kovalishin¹⁾, T. V. Kulevoy¹⁾, B. V. Kuteev¹⁾, V. O. Legostaev¹⁾, S. V. Malinovskiy¹⁾, K. V. Pavlov¹⁾, V. I. Rogov¹⁾, A. Yu. Titarenko¹⁾, R. S. Khalikov¹⁾, V. S. Stolbunov¹⁾, N. A. Kovalenko^{1),2)}, A. R. Moroz²⁾, S. V. Grigoryev²⁾, K. A. Pavlov²⁾

¹⁾National Research Center "Kurchatov Institute", Moscow, Russia

²⁾NRC "Kurchatov Institute" — PNPI, Gatchina, Russia

The results of determining the flux density of neutrons with energies up to 20 MeV, which were formed upon irradiation of Be with a thickness of 1.3 mm by a beam of protons with an energy of 21.3 MeV, are presented. The proton flux density was determined by standard instruments and controlled by the activation method using the monitor reactions ${}^{\text{nat}}\text{Cu}(p, x){}^{62}\text{Zn}$ and ${}^{\text{nat}}\text{Cu}(p, x){}^{63}\text{Zn}$, and the neutron flux density was determined using the reactions ${}^{27}\text{Al}(n, p){}^{27}\text{Mg}$ and ${}^{27}\text{Al}(n, \alpha){}^{24}\text{Na}$. The spectra of protons and neutrons at the center of the experimental samples were calculated using the PHITS code.