



**НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР
«КУРЧАТОВСКИЙ ИНСТИТУТ»**
Институт физики высоких энергий имени А.А. Логунова
Национального исследовательского центра
«Курчатовский институт»

Препринт 2022–4

В.В. Бабинцев, Ю.В. Белецкая, А.Г. Денисов, А.А. Дурум,
А.М. Мамаев, В.Н. Пелешко, И.Н. Пирязев, Я.Н. Расцветалов,
Е.Н. Савицкая, А.В. Санников, М.М. Сухарев, С.Э. Сухих,
А.А. Янович

**Измерение спектра нейтронов на стенде
«Нейтрон» спектрометром Боннера
с активационными детекторами**

Направлено в АЭ

Протвино 2022

Аннотация

Бабинцев В.В., Белецкая Ю.В., Денисов А.Г., Дурум А.А., Мамаев А.М., Пелешко В.Н., Пирязев И.Н., Расцветалов Я.Н., Савицкая Е.Н., Санников А.В., Сухарев М.М., Сухих С.Э., Янович А.А. Измерение спектра нейтронов на стенде «Нейтрон» спектрометром Боннера с активационными детекторами. Препринт НИЦ «Курчатовский институт» – ИФВЭ 2022-4. – Протвино, 2022. – 11 с., 5 рис., 2 табл., библиогр.: 12.

Стенд «Нейтрон» создан на ускорительном комплексе У-70 НИЦ «Курчатовский институт»–ИФВЭ для генерации импульсного нейтронного излучения в (p, xn) -реакциях протонов энергией 50 ГэВ на тяжелых мишенях. Измерялся спектр нейтронов из свинцовой мишени под 90° к пучку протонов спектрометром Боннера с активационными детекторами. В полиэтиленовых сферах Боннера различных диаметров размещали индиевые детекторы тепловых нейтронов ($^{115}\text{In}(n, \gamma)^{116\text{m}}\text{In}$ реакция). Высокоэнергетическая часть спектра регистрировалась углеродным детектором по реакции $^{12}\text{C}(n, 2n)^{11}\text{C}$ с порогом 20 МэВ. Гамма-излучение продуктов реакций измерялось германиевым гамма-спектрометром. Спектр нейтронов восстанавливался из экспериментальных данных по программе BON95 с использованием метода итераций. Начальный спектр для итерационной процедуры рассчитывался по программе FLUKA.

Abstract

Babintsev V.V., Beletskaya Yu.V., Denisov A.G., Durum A.A., Mamaev A.M., Peleshko V.N., Piryazev I.N., Rascvetalov Ya.N., Savitskaya E.N., Sannikov A.V., Sukharev M.M., Sukhikh S.E., Janovich A.A. Measurement of the Neutron Spectrum at the “Neutron” Test Bench by the Bonner spectrometer with activation detectors. NRC «Kurchatov Institute» – IHEP Preprint 2022-4 – Protvino, 2022. – p. 11, figs. 5, tables 2, refs.: 12.

The “Neutron” test bench has been developed at the NRC “Kurchatov Institute”–IHEP accelerator complex U-70 for generation of the pulsed neutron radiation using the (p, xn) -reactions of 50-GeV protons on heavy targets. The Bonner spectrometer with activation detectors was applied to measure the neutron spectrum at the angle 90° to the proton beam. Indium thermal neutron detectors ($^{115}\text{In}(n, \gamma)^{116\text{m}}\text{In}$ reaction) were placed in the polyethylene Bonner spheres of various diameters. High-energy part of the spectrum was registered by the carbon detector using $^{12}\text{C}(n, 2n)^{11}\text{C}$ reaction with the 20 MeV threshold. Gamma-radiation of the products of reactions was measured by germanium gamma-spectrometer. The neutron spectrum was unfolded from the experimental data by the BON95 code using the method of iteration. The initial spectrum for the iteration procedure was calculated by the FLUKA code.

Введение

Стенд «Нейтрон» на ускорительном комплексе У-70 НИЦ «Курчатовский институт» – ИФВЭ предназначен для генерации потоков импульсного нейтронного излучения высокой интенсивности в (p, xn) -реакциях на тяжелых ядрах и изучения их характеристик для возможности проведения нейтроно-графических исследований материалов и кинетики быстропротекающих процессов. В период 2019 – 2020 г. отработывались режимы работы стенда и исследовались параметры нейтронного пучка, выходящего под углом 90° к мишени-конвертору, облучаемой протонами энергией 50 ГэВ.

Цель работы – измерение спектра нейтронного пучка с помощью индиевого спектрометра Боннера (ИСБ) [1], дополненного углеродным активационным детектором (УАД) [2].

Геометрия измерений

Схема расположения стенда «Нейтрон» на базе действующего 23 канала ускорительного комплекса У-70 представлена на рис. 1. Мишень-конвертор размещена на оси пучка в разрезе ионопровода канала на высоте ~ 137 см от пола. Расстояние $\sim 0,5$ м от выходного окна ионопровода до передней плоскости мишени пучок протонов энергией 50 ГэВ проходит по воздуху.

Мишень длиной 30 см представляет собой свинцовый параллелепипед квадратного сечения со стороной квадрата 5 см. Боковая поверхность мишени покрыта замедлителем

из полиэтилена толщиной 4 см. Точка измерения спектра нейтронов находилась на расстоянии 12 м от центра боковой поверхности мишени перпендикулярно оси протонного пучка. Коллиматор для вывода пучка нейтронов в зону проведения измерений представляет собой систему двух соосных отверстий квадратного сечения размерами 30×30 см², выполненных в бетонных стенах биологической защиты толщиной 1 м и 2 м по выведенному пучку.

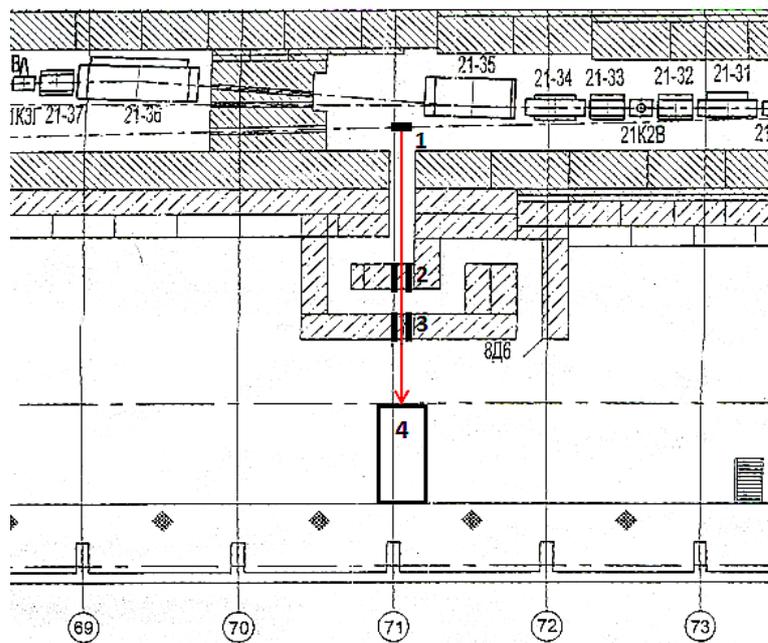


Рис. 1. Схема стенда «Нейтрон»: 1 – свинцовая мишень, покрытая полиэтиленом; 2 и 3 – коллиматоры; 4 – детектирующая аппаратура. Направление движения протонного пучка справа налево.

Пучок

Вывод пучка – быстрый (банчевая структура); длительность цикла ускорителя равна 8,7 с; длительность одного банча – 20 нс. Первичное положение пучка определялось с помощью видеокамеры и люминесцентного экрана, расположенного вблизи фронтальной плоскости мишени, а перед экспериментом проверялось экспонированием специальной мониторинговой пленки [3].

В сеансе 2019 г. размеры пучка на входе в мишень составляли $\sigma_x = 5$ мм по горизонтали и $\sigma_y = 4$ мм по вертикали со смещением по горизонтали вправо на 8 мм от центра мишени. В сеансе 2020 г. его размеры были $\sigma_x = 7$ мм и $\sigma_y = 4$ мм с аналогичным смещением по горизонтали.

Спектрометр нейтронов

ИСБ состоит из набора индиевых активационных детекторов тепловых нейтронов (реакция $^{115}\text{In}(n,\gamma)^{116\text{m}}\text{In}$), размещаемых в центре шаровых полиэтиленовых замедлителей диаметром 2, 3, 4, 5, 6, 8, 10 и 12 дюймов. Для измерения плотности потока тепловых нейтронов методом кадмиевой разности использовался также замедлитель диаметром 2 дюйма, покрытый кадмием толщиной 1 мм. Детекторы представляют собой индиевую фольгу диаметром 20 мм и массой $\sim 2,3$ г. Дополнительный углеродный активационный детектор (реакция $^{12}\text{C}(n,2n)^{11}\text{C}$, порог 20 МэВ) был изготовлен из графитового блока и плотно вставлен в сосуд Маринелли объемом 1 л.

Функции чувствительности (ФЧ) ИСБ и УАД были рассчитаны по программе HADRON [4] с низкоэнергетическим блоком FAN15 [5] и приведены на рис. 2 в единицах удельной активности детекторов на единичную плотность потока нейтронов. Погрешности ФЧ ИСБ оценены в 5% ниже 20 МэВ и 10% выше 20 МэВ. Погрешность ФЧ для УАД – 15% [2].

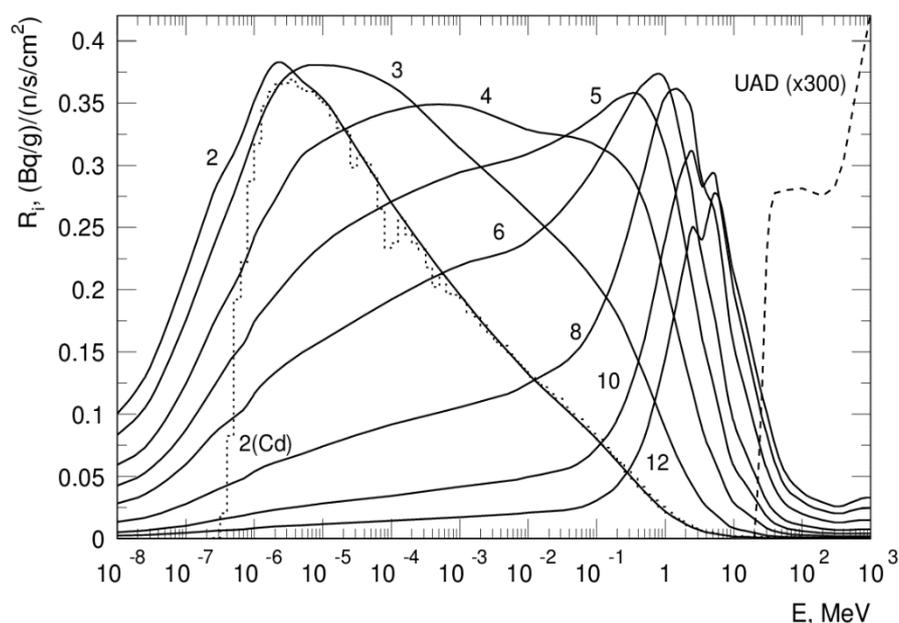


Рис. 2. Расчетные энергетические зависимости чувствительности ИСБ и УАД. Цифры у кривых – диаметры шаровых полиэтиленовых замедлителей ИСБ в дюймах. 2(Cd) указано точечной гистограммой.

Для уточнения ФЧ ИСБ была выполнена его градуировка в низкоэнергетическом поле установки УКПН-1М [6] с источником ^{239}Pu — Be по величине мощности амбиентного эквивалента дозы. Поправочный коэффициент для детекторов ИСБ $k = 1,14$ учтен при восстановлении нейтронных спектров на стенде «Нейтрон».

Результаты измерений

Облученные детекторы обсчитывались на полупроводниковом гамма-спектрометре СЕГ-1КП [7] по линии 1,294 МэВ нуклида $^{116\text{m}}\text{In}$ и по линии 0,511 МэВ нуклида ^{11}C в случае УАД. Зависимость эффективности регистрации спектрометра от энергии гамма-квантов получена с помощью эталонных гамма-источников 1 разряда набора ОСГИ, активность которых определена с неопределенностью $\pm 3\%$ при доверительной вероятности $p=0,95$.

Откликами детекторов, необходимыми для восстановления спектра нейтронов, являются значения их удельной активности в насыщении A_m , определяемые выражением:

$$A_m = \frac{S/T_{\text{изм}}}{m \cdot \varepsilon \cdot y} \cdot \frac{e^{\lambda T_{\text{выд}}}}{1 - e^{-\lambda T_{\text{обл}}}} \cdot \frac{\lambda T_{\text{изм}}}{1 - e^{-\lambda T_{\text{изм}}}} K, \text{ где} \quad (1)$$

$S/T_{\text{изм}}$ – скорость счета в пике;

m – масса детектора в граммах;

ε – эффективность регистрации гамма-квантов;

y – выход гамма-квантов;

$\lambda = \ln 2 / T_{1/2}$ ($T_{1/2}$ - период полураспада идентифицируемого радионуклида);

$T_{\text{обл}}$ – время облучения детектора;

$T_{\text{выд}}$ – время от окончания облучения до начала обсчета;

$T_{\text{изм}}$ – время измерения на гамма-спектрометре;

K – коэффициент, учитывающий поглощение гамма-квантов в детекторе.

В 2019 г. число падающих на мишень протонов за время облучения (N_p) определялось по данным пульта вывода пучка, а в 2020 г. по показаниям мониторов вторичного излучения, отградуированных по активации алюминиевой мониторной фольги. Результаты измерений приведены в табл. 1. Статистическая погрешность N_p данных главного

пульта составляла 4%, показаний монитора – 3%. Систематическая неопределенность \dot{N}_P , связанная с калибровкой приборов, в обоих случаях ~10%. Сечение мониторинговой реакции $^{27}\text{Al}(\text{p},\text{3p3n})^{22}\text{Na}$ при 50 ГэВ взято равным $10,3 \text{ мб} \pm 8,7\%$ [8].

Удельные активности насыщения индиевых детекторов и УАД, нормированные на число падающих на мишень протонов в секунду, (A_m/\dot{N}_P) приведены на рис. 3. Систематическая неопределенность \dot{N}_P не учитывалась в погрешности A_m/\dot{N}_P , так как она не влияет на форму спектра, но учитывалась в погрешностях интегральных характеристик при нормировке на один протон пучка. Значения A_m/\dot{N}_P в сеансах 2019 и 2020 г. отличаются в среднем на 20% друг от друга. Это связано главным образом с разными размерами пучка в месте падения на мишень и разными методами определения числа падающих на мишень протонов за время облучения.

Таблица 1. Удельные активности индиевых детекторов и УАД в насыщении и число падающих на мишень протонов в секунду.

d , дюйм	2019 г.		2020 г.	
	\dot{N}_P , 10^{10} протон/с	A_m , Бк/г	\dot{N}_P , 10^{10} протон/с	A_m , Бк/г
2 (Cd)	5,0	$17151 \pm 6,1\%$	2,7	$9942 \pm 4,8\%$
2	3,0	$18286 \pm 6,2\%$	2,4	$15950 \pm 4,9\%$
3	2,6	$30384 \pm 6,5\%$	3,9	$49555 \pm 4,3\%$
4	3,8	$67276 \pm 6,5\%$	2,7	$59924 \pm 4,4\%$
5	3,9	$86382 \pm 6,2\%$	2,8	$72138 \pm 4,3\%$
6	3,9	$78234 \pm 6,3\%$	2,7	$68339 \pm 4,3\%$
8	3,2	$74396 \pm 6,2\%$	5,2	$140358 \pm 4,1\%$
10	3,5	$58196 \pm 6,2\%$	4,4	$92381 \pm 4,2\%$
12	4,6	$58439 \pm 6,2\%$	5,2	$84365 \pm 4,1\%$
УАД	7,1	$89,6 \pm 9,1\%$	5,4	$93 \pm 7,3\%$

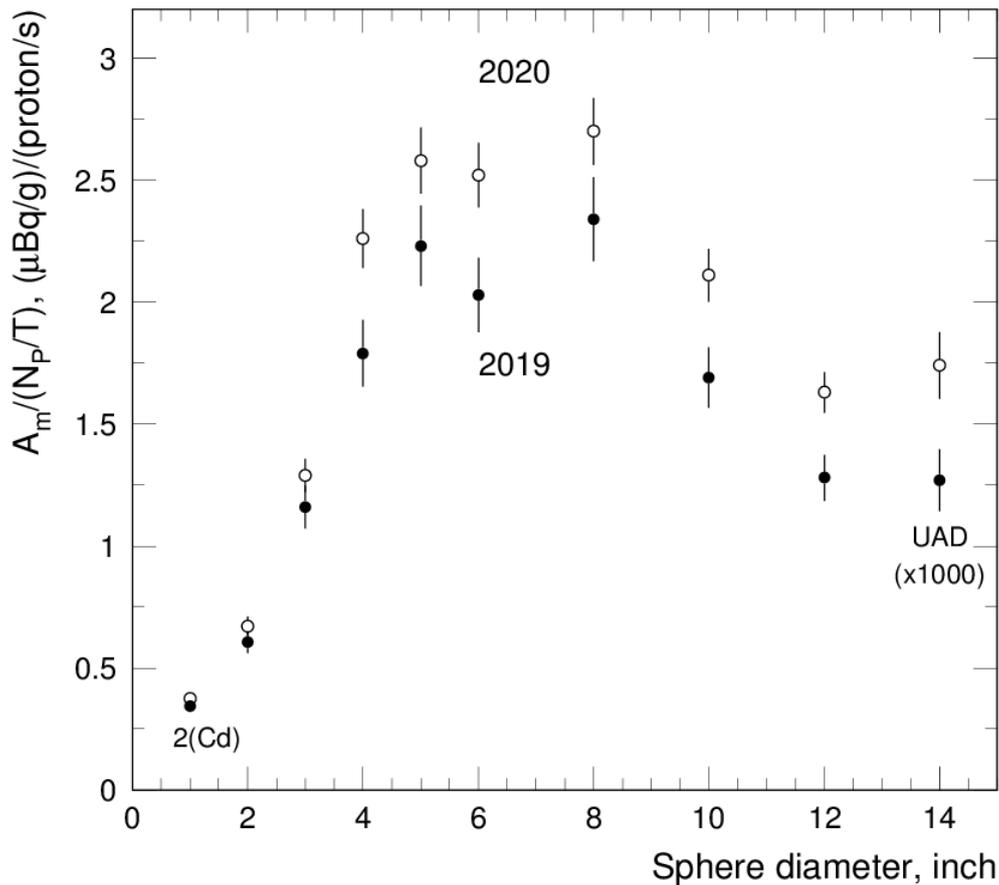


Рис. 3. Удельные активности детекторов ИСБ и УАД в 2019 г. и 2020 г., нормированные на число падающих на мишень протонов в секунду.

Программа восстановления нейтронных спектров BON95

Программа BON95 [9, 10] методами параметризации и итераций реализует решение системы уравнений

$$M_i = \sum_{j=1}^n R_i(E_j)\varphi(E_j)\Delta E_j + \Delta M_i, \quad i=1, \dots, m. \quad (2)$$

Здесь $M_i = A_m / \dot{N}_p$ – показания в единицах удельной активности детекторов в насыщении, нормированные на число падающих на мишень протонов в секунду; $R_i(E_j)$ – ФЧ; $\varphi(E_j)$ – искомый спектр нейтронов в групповом представлении; ΔM_i – неопределенности, включающие погрешности результатов измерений ΔM_i^{exp} и погрешности ФЧ $\Delta R_i(E_j)$.

Начальный спектр $\varphi_p(E_j)$ может создаваться программой BON95 методом параметризации в виде линейной суперпозиции максвелловского пика тепловых нейтронов, $1/E$ для промежуточных нейтронов, пика испарительных нейтронов и квазимакселловского пика каскадных нейтронов.

Кроме того, $\varphi_p(E_j)$ может задаваться непосредственно в виде файла. Этот спектр может быть получен расчетным путем, в результате измерения другим спектрометром или из литературных данных. В настоящей работе он рассчитывался по программе FLUKA [11].

Спектр $\varphi_p(E_j)$ подвергается итерационной процедуре метода направленного расхождения [12] с критерием окончания $\chi^2 < 1$. Полученный для $M_i = A_m/\dot{N}_P$ спектр $\varphi_0(E_j)$ используется в расчете полных неопределенностей ΔM_i :

$$\Delta M_i = \sqrt{(\Delta M_i^{exp})^2 + \left[\sum_{j=1}^n \Delta R_i(E_j) \varphi_0(E_j) \Delta E_j \right]^2} . \quad (3)$$

Процедура поиска спектра $\varphi_0(E_j)$ выполняется для N различных комбинаций показаний спектрометра: $M_i' = M_i + \xi \cdot \Delta M_i$, где ξ – случайное число с нормальным распределением. В результате получаем N различных нейтронных спектров (стандартное значение $N=25$), по которым определяются средние значения и неопределенности спектра и различных функционалов.

Восстановление спектра нейтронов с использованием расчетного спектра по программе FLUKA

Расчеты по программе FLUKA проводились в два этапа. Сначала моделировалось прохождение пучка протонов через мишень и отбирались вторичные частицы, которые идут в направлении коллиматора 2 (см. рис. 1). Статистика составила $4 \cdot 10^6$ событий. Далее для увеличения статистики размножали поток частиц с коэффициентом 100. Для этого вычисляли точку входа каждой частицы в коллиматор и на радиусе в пределах 10 см от нее генерировались случайным образом 100 новых частиц со своим вектором. Размеры виртуального воздушного детектора в точке измерения, в котором рассчитывался

поток нейтронов, составляли $5 \times 5 \text{ см}^2$. Статистическая погрешность расчетных данных составляла несколько процентов.

Результаты расчета спектра нейтронов показаны на рис. 4. Далее расчетный спектр закладывался в качестве начального в итерационную процедуру программы BON95 с экспериментальными данными A_m/\dot{N}_P . Вклад заряженных частиц в активацию углерода оценен с использованием рассчитанного по программе FLUKA спектра протонов и ФЧ УАД для протонов, рассчитанной по программе HADRON. В результате этого активность УАД при восстановлении уменьшена на 14,5%, за которые ответственны протоны. Восстановленный спектр нейтронов приведен на рис. 4.

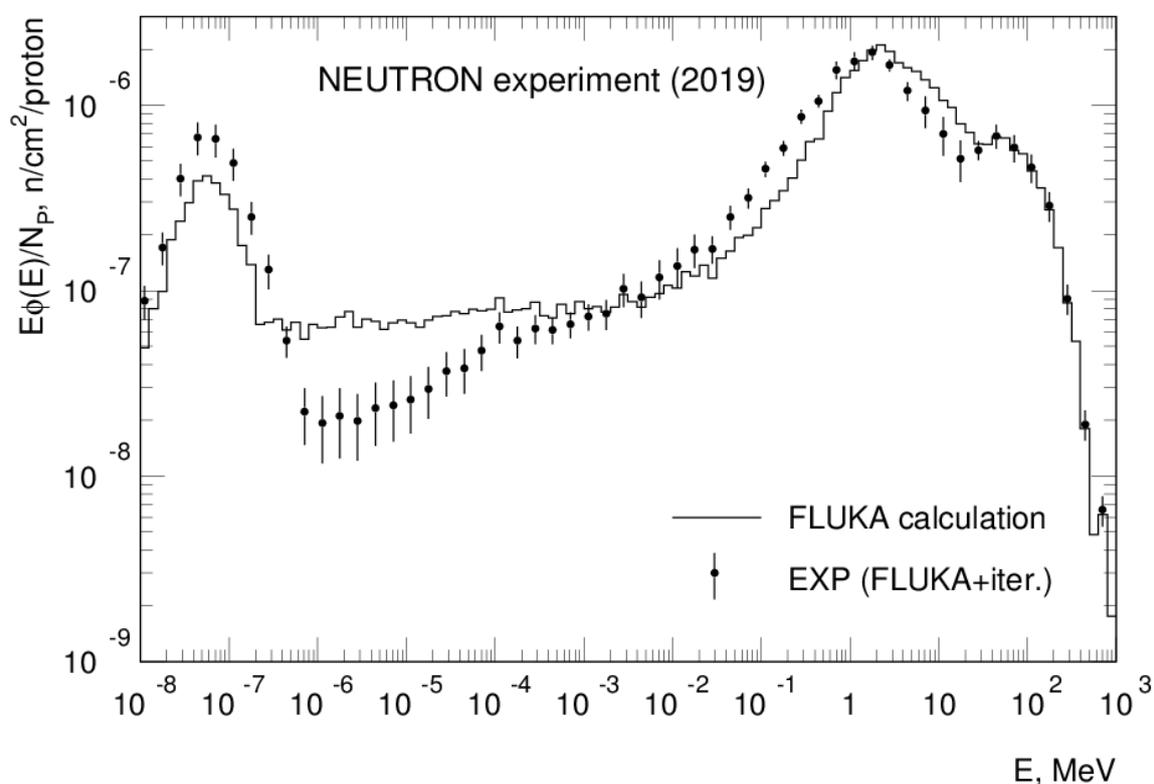


Рис. 4. Спектр нейтронов, восстановленный из данных 2019 г, в сравнении с расчетом по программе FLUKA.

Спектр нейтронов, восстановленный из данных 2020 г., представлен на рис. 5 в сравнении со спектром 2019 г. с нормировкой на 1 нейтрон/см². Расхождение между двумя спектрами имеет место в диапазоне промежуточных энергий и выше 5 МэВ вследствие различий значений A_m/\dot{N}_P для сфер Боннера диаметром 4" (26%), 10" (25%) и 12"

(27%), а также УАД (37%) в сеансах 2019 г. и 2020 г. Тем не менее спектры близки по форме, и коридоры их неопределенностей перекрываются.

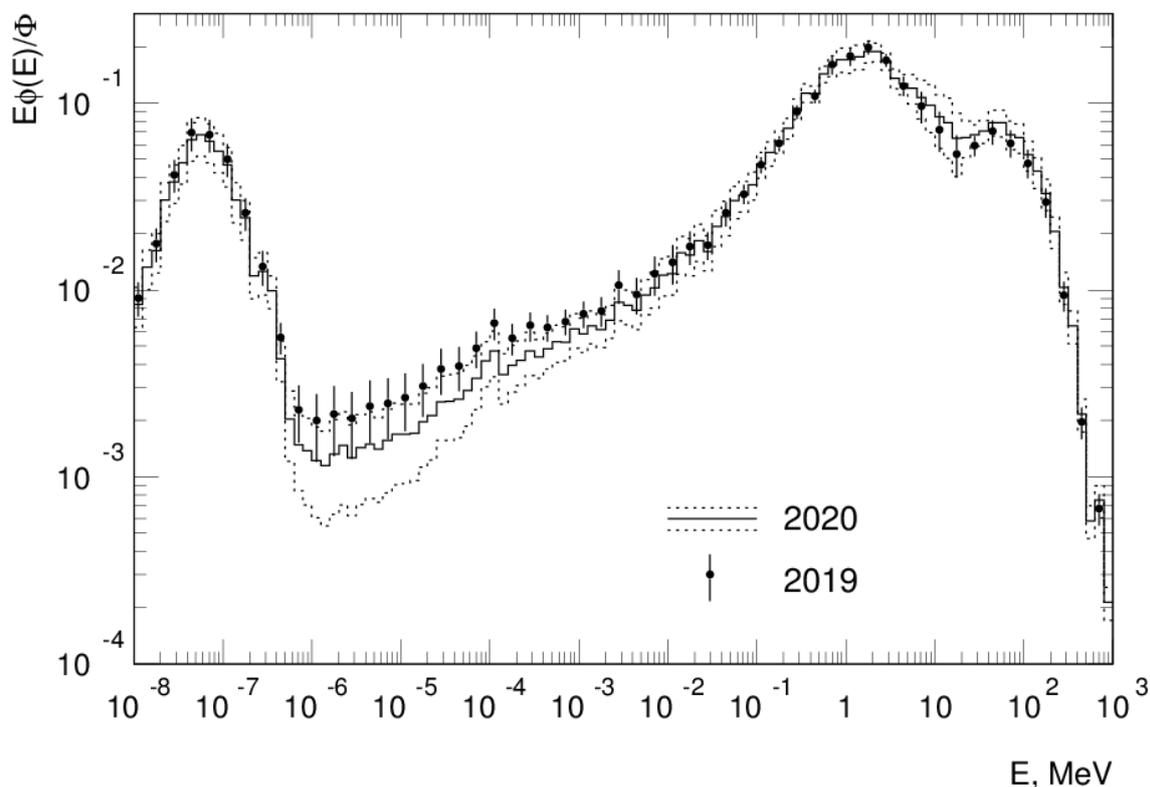


Рис. 5. Спектры нейтронов, нормированные на один нейтрон/ см^2 .

Спектры имеют три характерных пика: тепловой, испарительный и каскадный с максимумами при энергиях $5,5 \cdot 10^{-8}$, 2 и 55 МэВ соответственно.

В табл. 2 представлены интегральные величины, рассчитанные по спектрам нейтронов рис. 5. Наибольшее различие, составляющее 27%, наблюдается в значениях мощности амбиентного эквивалента дозы нейтронов, нормированной на число падающих на мишень протонов в секунду. Это объясняется тем, что максимальное расхождение спектров рис. 5 имеет место в диапазонах энергий быстрых и высокоэнергетических нейтронов, где значения удельного амбиентного эквивалента дозы достигают максимума. Основной вклад во флюенс (более 60%) вносят быстрые нейтроны. Вклады других слагаемых спектра составляют 9-15%.

Таблица 2. Интегральные величины, рассчитанные по спектрам нейтронов рис. 5. \bar{E} – средняя энергия спектра надкадмиевых нейтронов (выше 0,4 эВ); Φ/N_P – флюенс нейтронов, нормированный на число падающих на мишень протонов; $\dot{H}^*(10)/\dot{N}_P$ – мощность амбиентного эквивалента дозы нейтронов, нормированная на один падающий на мишень протон в секунду.

Величина	2019 г.	2020 г.
\bar{E} , МэВ	$15,0 \pm 1,8$	$16,5 \pm 1,8$
Φ/N_P , н/см ² /протон	$(9,7 \pm 1,0) \cdot 10^{-6}$	$(1,2 \pm 0,1) \cdot 10^{-5}$
$\dot{H}^*(10)/\dot{N}_P$, (мкЗв/час)/(протон/с)	$(1,0 \pm 0,1) \cdot 10^{-5}$	$(1,3 \pm 0,1) \cdot 10^{-5}$
Вклады нейтронов в полный флюенс, %		
Тепловые (ниже 0,4 эВ)	13	13
Промежуточные (0,4 эВ – 0,1 МэВ)	11	9
Быстрые (0,1-20 МэВ)	62	63
Высокоэнергетические (выше 20 МэВ)	14	15

Заключение

Спектры нейтронов на стенде «Нейтрон» восстановлены по программе BON95 методом итераций по результатам измерений индиевым активационным спектрометром Боннера и углеродным активационным детектором в двух сеансах 2019 г. и 2020 г. Выполнены расчеты спектра нейтронов в геометрии стенда «Нейтрон» по программе FLUKA. Расчетный спектр использован в качестве начального спектра в итерационной процедуре программы BON95. Сравнение полученных спектров в двух сеансах показало их близость по форме и систематическое расхождение интегральных величин, в среднем на 20%, что объясняется разными размерами пучка падающих на мишень протонов в сеансах 2019 и 2020 г. и разными методами определения числа падающих на мишень протонов за экспозицию.

Список литературы

- [1] **Крупный Г.И., Расцветалов Я.Н., Савицкая Е.Н., Санников А.В.** Многошаровой спектрометр нейтронов с активационным детектором тепловых нейтронов на основе

- реакции $^{115}\text{In}(n,\gamma)^{116m}\text{In}$. Тезисы докл. IX Рос. научной конф. «Радиационная защита и радиационная безопасность в ядерных технологиях», 2006, с. 121—123.
- [2] **Крупный Г.И., Пелешко В.Н., Расцветалов Я.Н., Савицкая Е.Н., Санников А.В.** Высокоэнергетическое опорное поле нейтронного излучения. — Атомная энергия, 2009, т. 107, с. 159—165.
- [3] **Sorriaux J., Kacperek A., Rossomme S., Lee J.A., Bertrand D., Vynckier S., Sterpin E.** Evaluation of Gafchromic® EBT3 films characteristics in therapy photon, electron and proton beams. — European Journal of Medical Physics, 2013, v. 29, No 6, p. 599—606.
- [4] **Sannikov A.V., Savitskaya E.N.** Physics of the HADRON code: recent status and comparison with experiment. — Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res, 2000, v. A450, p. 127—137.
- [5] **Савицкая Е.Н., Санников А.В.** Программа FAN15 для расчета переноса низкоэнергетических фотонов и нейтронов в произвольных средах. — Атомная энергия, 2017, т. 122, с. 40—45.
- [6] **Свидетельство** о поверке № АБ 0108686 «Установка поверочная нейтронного излучения УКПН-1М». ФБУ «Ростест-Москва». 10.10.2019 г.
- [7] **Спектрометр** энергии гамма-излучения полупроводниковый СЕГ-1КП (Зав. №120). Паспорт. АО «ИФТП», Дубна, 2018.
- [8] **Крупный Г.И., Снитко Д.В., Янович А.А.** — Препринт ИФВЭ 2000-13, Протвино, 2000.
- [9] **Sannikov A.V.** BON95, a universal user-independent unfolding code for low informative neutron spectrometers. GSF report. Munich, 1995.
- [10] **Санников А.В.** Развитие методов спектрометрии нейтронного излучения на больших протонных ускорителях. Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук. Протвино, 2006.
- [11] **Ferrari A., Sala P.R., Fasso A., Ranft J.** FLUKA: a multi-particle transport code. CERN-2005-10, 2005.
- [12] **Тараско М.З.** Об одном методе решения линейных задач со стохастическими матрицами. Препринт ФЭИ-156, Обнинск, 1969.

Рукопись поступила 22 марта 2022 г.

В.В. Бабинцев, Ю.В. Белецкая, А.Г. Денисов, А.А. Дурум, А.М. Мамаев, В.Н. Пелешко, И.Н. Пирязев, Я.Н. Расцветалов, Е.Н. Савицкая, А.В. Санников, М.М. Сухарев, С.Э. Сухих, А.А. Янович.

Измерение спектра нейтронов на стенде «Нейтрон» спектрометром Боннера с активационными детекторами.

Препринт отпечатан с оригинала-макета, подготовленного авторами.

Подписано к печати	31.03.2022	Формат 60 × 84/16.	Цифровая печать.	
Печ.л. 1.	Уч.–изд.л. 1,25.	Тираж 60.	Заказ 5.	Индекс 3649.

НИЦ «Курчатовский институт» – ИФВЭ
142281, Московская область, г. Протвино, пл. Науки, 1

www.ihep.ru; библиотека <http://web.ihep.su/library/pubs/all-w.htm>

Индекс 3649

ПРЕПРИНТ 2022-4,
НИЦ «Курчатовский институт» – ИФВЭ, 2022
