

# Спектры нейтронов фильтрованных пучков реактора Первой в мире (Обнинской) АЭС

КУЗИН Е. Н., БЕЛОВ С. П., ДВУХШЕРСТНОВ В. Г., ФУРМАНОВ В. М., ЩАДИН Н. Н.

УДК 539.125.5.18

Необходимость уточненных ядерно-физических данных для расчетов быстрых реакторов привела к созданию новых методов измерений различных сечений взаимодействия нейтронов или их отношений. В последнее время наряду с методами, использующими ускорители и технику времени пролета, получил распространение метод фильтрованных пучков [1—3], основанный на применении толстых фильтров из различных элементов, ядра которых имеют глубокие интерференционные минимумы в полных сечениях. Такие фильтры, помещенные в хорошо сколламированный пучок нейтронов мощного реактора, позволяют получить на выходе сформированный нейтронный спектр с преобладанием нейтронного потока в достаточно узкой энергетической области вблизи интерференционного минимума в полном сечении. Используя этот метод, можно получить достаточно интенсивные пучки квазимонохроматических нейтронов, часто имеющие низкий фон  $\gamma$ -излучения. В области энергий 1—1000 *кэв* наиболее широко применяются фильтры из скандия, железа и кремния. Спектры нейтронов, полученные с помощью таких фильтров, имеют интенсивные пики соответственно при энергиях 2; 24,5; 55 и 144 *кэв*. Обычно для повышения степени монохроматичности фильтрованных пучков используются дополнитель-

ные фильтры из материалов, слабо меняющих интенсивность основного пика и выводящих из пучков нейтроны других энергий. В связи с развитием метода спектрометрии нейтронов с помощью пропорциональных счетчиков протонов отдачи [4, 5], позволяющего детально изучить их спектральные характеристики и на этой основе сформировать оптимальным образом спектр нейтронов, значительно повысилась ценность фильтрованных пучков.

В настоящей работе приведены результаты измерений спектров нейтронов одного из горизонтальных пучков реактора Обнинской АЭС, фильтрованных скандием, железом и кремнием, а также оптимальные наборы основных и дополнительных фильтров применительно к реакторам типа Обнинской АЭС.

## Экспериментальная установка

**Геометрия эксперимента.** Спектры нейтронов, фильтрованных скандием, железом и кремнием с дополнительными фильтрами из серы, алюминия, титана, марганца и бора, измерены на уран-графитовом реакторе Обнинской АЭС при тепловой мощности  $\sim 12$  *Мвт*. Геометрия эксперимента показана на рис. 1. Пучок нейтронов выводился с границы активной зоны — отражатель по горизонтальному каналу диаметром

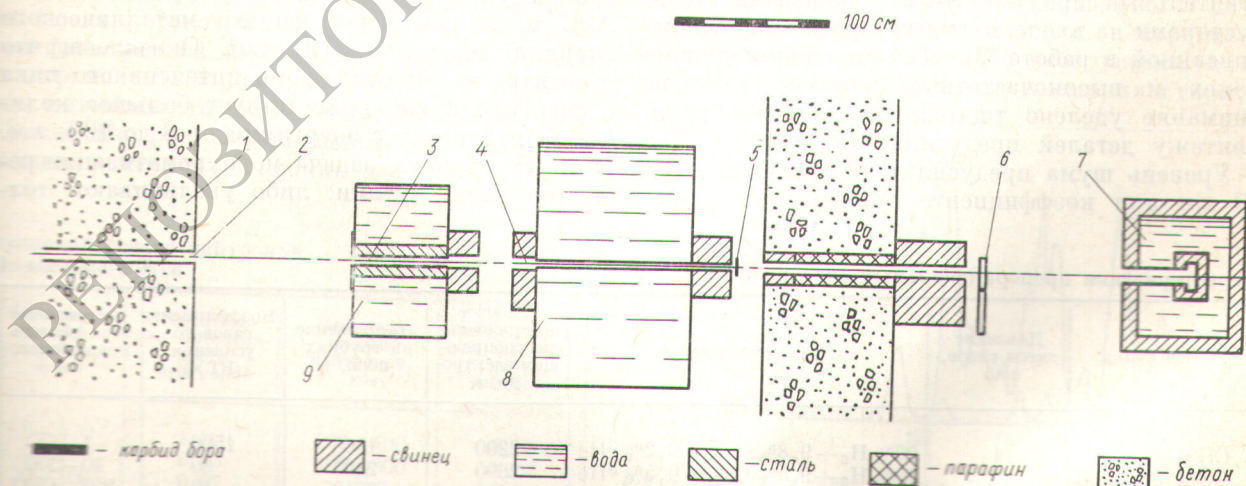


Рис. 1. Геометрия эксперимента:

1 — защита реактора; 2 — пучок нейтронов; 3 — фильтры из Sc, Fe, Si; 4 — фильтры из Ti, Mn, Co, Al, S; 5 — фильтр из  $^{238}\text{U}$ ; 6 — детектор нейтронов; 7 — нейтронная «ловушка»; 8, 9 — коллимационные баки с борированной водой.

50 мм и длиной 5 м через графитовый отражатель и защиту реактора. Выходящий из защиты реактора пучок нейтронов формировался двумя железо-водными коллиматорами с отверстиями диаметром 30 и 20 мм. Фильтры из скандия (99,85%), железа (сталь армко) и кремния (99,9%) помещались в 30-миллиметровое отверстие стальной вставки первого коллимационного бака. Дополнительные фильтры из титана, марганца, кобальта, серы и алюминия устанавливались перед 20-миллиметровым отверстием второго коллимационного бака, а фильтр из  $^{10}\text{B}$  — на выходе нейтронного пучка в измерительное помещение. Для уменьшения фона  $\gamma$ -излучения коллимационные баки заполнялись раствором борной кислоты в воде, а вдоль пучка устанавливали несколько свинцовых коллиматоров.

**Детекторы.** Для измерений спектров нейтронов использовались цилиндрические пропорциональные счетчики, наполненные смесями водорода и метана. Счетчики устанавливались за выходным отверстием последнего свинцового коллиматора так, чтобы ось пучка была перпендикулярна к оси счетчика. Счетчики представляют собой цилиндры диаметром 32 мм со стенкой из нержавеющей стали толщиной 0,5 мм; собирающий электрод выполнен из вольфрамовой проволоки диаметром 0,03 мм; длина чувствительного объема (~100 мм) ограничена трубками поля; изоляторы счетчиков выполнены из стекла. Другие характеристики счетчиков приведены в табл. 1.

Для усиления импульсов счетчиков использован быстрый низкошумящий зарядово-чувствительный предусилитель с полевыми транзисторами на входе, схема которого аналогична описанной в работе [6]. Для снижения уровня помех и высокочастотных наводок большое внимание уделено тщательной экранировке и монтажу деталей предусилителя.

Уровень шума предусилителя оценен в 20—40 кэв при коэффициенте газового усиления,

равном единице. Далее импульсы с предусилителя подавались на спектрометрический неперегружающийся усилитель с постоянными интегрирования и дифференцирования 0,5 и 7,5 мксек. Энергетическая шкала спектрометра калибровалась на пучке тепловых нейтронов по пику поглощения полной кинетической энергии продуктов реакций  $^3\text{He}(n, p)^3\text{H} + 765$  кэв для водородных счетчиков и  $^{14}\text{N}(n, p)^{14}\text{C} + 627$  кэв для метанового счетчика и по пику генератора точной амплитуды типа NZ-256. Импульсы генератора подавались на вход предусилителя, что позволяло также контролировать стабильность всего усилительного тракта спектрометра. Амплитудные распределения импульсов от протонов отдачи регистрировались анализатором NTA-512. (В работе [7] подробно описана конструкция счетчиков и предусилителя.)

Аппаратурные распределения импульсов протонов отдачи преобразовывались в энергетические спектры нейтронов методом дифференцирования «подвижной полосой» [8]. В энергетические спектры нейтронов не вносились поправки на стечный эффект, поскольку в измеряемых спектрах содержится мало нейтронов с высокими энергиями. Предполагается, что учет этого эффекта приведет к поправкам в спектрах не более 5—10%.

### Результаты измерений

**Скандиевый пучок нейтронов с энергией 2 кэв.** Для получения спектра нейтронов с интенсивным пиком при энергии 2 кэв пучок нейтронов уран-графитового реактора Обнинской АЭС пропущен через фильтр металлического скандия толщиной 219 г/см<sup>2</sup>. Оказалось, что в спектре нейтронов, кроме интенсивного пика с энергией 2 кэв, присутствует большое количество нейтронов с энергиями от 8 до 100 кэв. В таких случаях задача монохроматизации решается двумя путями: либо увеличивают тол-

Характеристики пропорциональных счетчиков

Таблица 1

Тип счетчика	Давление смеси газов, ата	Состав смеси газов	Рабочее напряжение на собирающем электроде, в	Напряжение на трубках поля, в	Коэффициент газового усиления (КТУ)	Энергетическая область применения, кэв
СНМ-47	1	90% H <sub>2</sub> + 9,8% CH <sub>4</sub> + 0,2% <sup>3</sup> He	2200	1560	1500	1—15
СНМ-38	3	90% H <sub>2</sub> + 9,5% CH <sub>4</sub> + 0,5% <sup>3</sup> He	2600	2300	80	10—300
СНМ-39	4	95% CH <sub>4</sub> + 5% N <sub>2</sub>	3400	3010	10	200—1300

щину основного фильтрующего элемента, либо подбирают дополнительные фильтры из элементов, ядра которых имеют пики в полных нейтронных сечениях при тех энергиях, где в полном сечении ядер основного фильтра минимума.

Однако увеличение толщины основного фильтрующего элемента неизбежно приведет к потере интенсивности выделяемого пика нейтронов; подбирая дополнительные фильтры, также надо заботиться о том, чтобы полные сечения ядер этих фильтров были малы в области энергии выделяемого пика.

В настоящей работе задача монохроматизации решается в основном другим путем: монохроматизируется не спектр выходящих из фильтра нейтронов, а некий спектр «эффекта». Спектр нейтронов «эффекта» какого-либо пучка — это спектр, определенный как разность спектров «эффект + фон» ( $\Phi + \Phi$ ) и «фон» ( $\Phi$ ), где «эффект + фон» — спектр нейтронов за набором фильтров с выделенным пиком, интенсивность которого сравнима с интегральной интенсивностью всех нейтронов других энергий; «фон» — спектр нейтронов, измеренный за тем же набором фильтров с одним или несколькими дополнительными фильтрами, наиболее эффективно поглощающими нейтроны выделенного пика. Для скандиевого пучка дополнительными фильтрами при измерении фона могут быть рекомендованы тонкие фильтры из  $^{142}\text{Ce}$  и  $\text{Mn}$ , ядра которых имеют максимумы в полных сечениях в диапазоне 1,3 и 2,38 кэВ.

На рис. 2 показан спектр нейтронов «эффекта» скандиевого пучка с толщиной фильтров из скандия и титана 219 и 6,7 г/см<sup>2</sup> соответственно. Спектр «фона» измерялся с дополнительным фильтром из марганца толщиной 4,5 г/см<sup>2</sup>; фильтр из титана использовался для подавления интенсивного пика нейтронов с энергией ~8 кэВ. На рис. 2 скандиевый пик несколько смещен в сторону высоких энергий, однако,

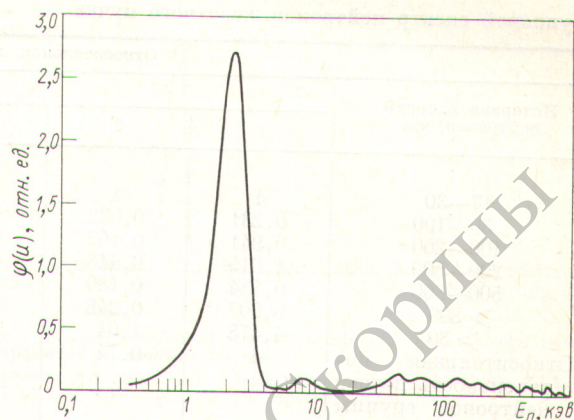


Рис. 2. Энергетический спектр нейтронов «эффекта» скандиевого пучка.

если учесть зависимость энергии ионообразования на водороде в области ниже 10 кэВ [9], пик сместится к энергии 2 кэВ. Ширина этого пика на полувысоте оказалась равной 1,3 кэВ (естественная ширина скандиевого пика ~0,7 кэВ), а интенсивность нейтронного потока  $\approx 5 \times 10^4$  нейтр/см<sup>2</sup>·сек. В табл. 2 приведены относительные интенсивности различных энергетических групп нейтронов спектра «эффекта» скандиевого пучка.

При оценке фона  $\gamma$ -квантов в опытах с заменой фильтра марганца на эквивалентный по ослаблению  $\gamma$ -излучения фильтр из кобальта, который мало (~10%) ослаблял поток нейтронов с энергией 2 кэВ, установлено, что в скандиевом пучке  $\gamma$ -кванты практически отсутствуют.

**Железные нейтронные пучки.** На рис. 3 показаны энергетические спектры нейтронов, фильтрованных сравнительно небольшими толщинами железа (сталь армко), алюминия и серы,

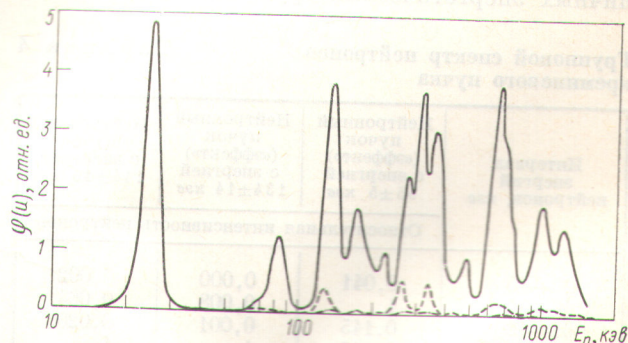


Рис. 3. Энергетические спектры нейтронов железных пучков реактора Обнинской АЭС.

Толщина фильтров (в скобках), г/см<sup>2</sup>: — Fe(240); — — — Fe(240), Al(40,5), S(5,7),  $^{10}\text{B}$ (0,2); - - - - - спектр нейтронов «эффекта».

Групповой спектр нейтронов скандиевого пучка

Таблица 2

Интервал энергий нейтронов, кэВ	Относительная интенсивность нейтронов	Интервал энергий нейтронов, кэВ	Относительная интенсивность нейтронов
0,6—4,0	1,00	200—400	0,02
4,0—20	0,03	400—800	0,02
20—100	0,07	> 800	0,00
100—200	0,04	> 4,0	0,18

Групповой спектр нейтронов железного пучка

Таблица 3

Интервал энергий нейтронов, <i>кэв</i>	Относительная интенсивность нейтронов						
	Номер пучка						
	1	2	3	4	5	6	7
17—30	1	1	1	1	1	1	1
30—100	0,231	0,032	0,004	0,013	0,000	0,037	0,003
100—200	0,941	0,167	0,021	0,068	0,008	0,131	0,009
200—500	1,615	0,413	0,040	0,158	0,022	0,171	0,025
500—800	0,784	0,180	0,019	0,057	0,004	0,080	0,012
> 800	0,907	0,248	0,017	0,052	0,002	0,105	0,014
> 30	4,478	1,04	0,101	0,348	0,036	0,524	0,063
Относительная интенсивность потока нейтронов группы 17—30 <i>кэв</i>	1	0,74	0,58	0,52	0,40	0,98	0,82

При м е ч а н и е. Состав использованных фильтров (цифры перед символами элементов указывают толщину фильтра, *г/см<sup>2</sup>*):  
 1-й пучок: 240 Fe.  
 2-й пучок: 240Fe + 18,9Al + 5,7S + 0,210B.  
 3-й пучок:  $\Theta = (\Theta + \Phi) - \Phi$ ;  $(\Theta + \Phi) = 240\text{Fe} + 18,9\text{Al} + 5,7\text{S} + 0,210\text{B}$ ;  $\Phi = 240\text{Fe} + 18,9\text{Al} + 5,7\text{S} + 0,210\text{B} + 3,4\text{Ti}$ .  
 4-й пучок: 240Fe + 40,5Al + 5,7S + 0,210B.  
 5-й пучок:  $\Theta = (\Theta + \Phi) - \Phi$ ;  $(\Theta + \Phi) = 240\text{Fe} + 40,5\text{Al} + 5,7\text{S} + 0,210\text{B}$ ;  $\Phi = 240\text{Fe} + 40,5\text{Al} + 5,7\text{S} + 0,210\text{B} + 3,4\text{Ti}$ .  
 6-й пучок: 162Fe + 40,5Al + 5,7S + 0,210B.  
 7-й пучок:  $\Theta = (\Theta + \Phi) - \Phi$ ;  $(\Theta + \Phi) = 162\text{Fe} + 40,5\text{Al} + 5,7\text{S} + 0,210\text{B}$ ;  $\Phi = 162\text{Fe} + 40,5\text{Al} + 5,7\text{S} + 0,210\text{B} + 3,4\text{Ti}$ .

а также один из спектров нейтронов «эффекта». Все спектры, показанные на рис. 3, нормированы по интенсивности пика нейтронов с энергией 24,5 *кэв*. Энергетическое положение пиков в спектрах, а также характер изменения спектров за счет введения дополнительных фильтров для монохроматизации пучков соответствуют структуре их полных поперечных сечений. Интенсивность нейтронного пика с энергией  $24,5 \pm 1,0$  *кэв* в месте расположения детектора при толщине железного фильтра 240 *г/см<sup>2</sup>* оказалась равной  $2 \cdot 10^4$  *нейтр/см<sup>2</sup>·сек*. В табл. 3 приведены относительные интенсивности различных энергетических групп нейтронов спек-

тров железных пучков реактора Обнинской АЭС.

Из табл. 3 видно, что при введении дополнительного фильтра из титана толщиной 3,4 *г/см<sup>2</sup>* для измерений спектров «фонов» железных пучков получены спектры «эффектов» без существенной потери интенсивности основного нейтронного пика с энергией 24,5 *кэв*, но с заметным улучшением степени монохроматичности.

**Кремниевые нейтронные пучки.** На рис. 4 показан спектр нейтронов за кремниевым фильтром толщиной 118 *г/см<sup>2</sup>* и дополнительным фильтром из титана толщиной 7,9 *г/см<sup>2</sup>* для подавления нейтронов с энергией 50—60 *кэв*. Положение пиков соответствует энергиям нейтронов 144 и 50 *кэв*, где в полном поперечном сечении ядер кремния имеются глубокие минимумы. Отличие в положении пика с энергией 50 *кэв* от данных работы [3] обусловлено дополнительным фильтром из титана, поведение полного сечения которого при энергии 50—60 *кэв* объясняет его смещение. Измерения спектра «фона» нейтронного пучка с энергией 144 *кэв* с помощью фильтра из серы толщиной 5,7 *г/см<sup>2</sup>* позволили получить спектр «эффекта» с нейтронным пиком 134 *кэв* и высокой степенью монохроматичности. Потoki нейтронов с энергиями  $144 \pm 15$  и  $134 \pm 14$  *кэв* оказались равными  $8 \cdot 10^4$  и  $4 \cdot 10^4$  *нейтр/см<sup>2</sup>·сек*.

Групповой спектр нейтронов кремниевого пучка

Таблица 4

Интервал энергий нейтронов, <i>кэв</i>	Нейтронный пучок («эффект») с энергией 55±5 <i>кэв</i>	Нейтронный пучок («эффект») с энергией 134±14 <i>кэв</i>	Нейтронный пучок с энергией 144±15 <i>кэв</i>
	Относительная интенсивность нейтронов		
20—40	0,041	0,000	0,002
40—65	1	0,008	0,064
65—100	0,145	0,001	0,020
100—200	0,047	1	1
200—600	0,001	0,002	0,006
600—1000	0,024	0,008	0,012
> 1000	0,077	0,019	0,036

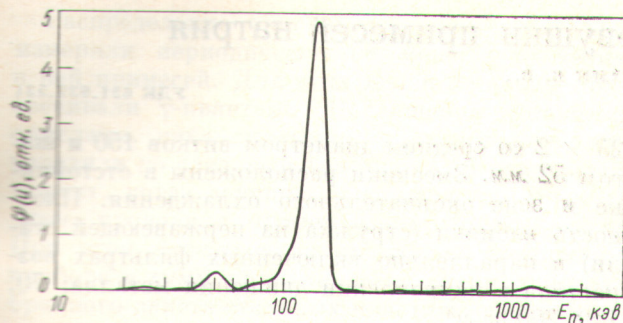


Рис. 4. Энергетический спектр нейтронов кремниевого пучка с энергией 144 кэВ.

Толщина фильтров, г/см<sup>2</sup>: Si(118), Ti(7,9), <sup>10</sup>B(0,2).

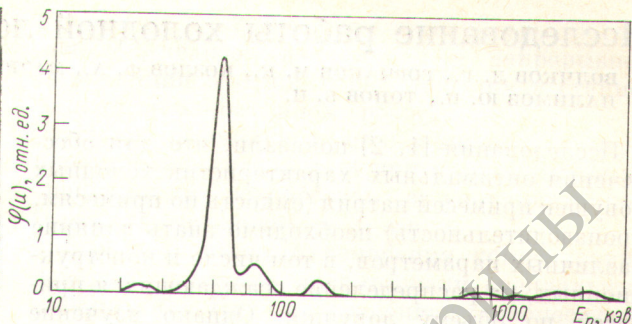


Рис. 5. Энергетический спектр нейтронов кремниевого пучка («эффект») с энергией 55 кэВ.

Толщина фильтров, г/см<sup>2</sup>: «эффект» + «фон» — Si(87,9), S(34,6), <sup>10</sup>B(0,2); «фон» — эти же фильтры и Ti(7,9).

Используя основной фильтр из кремния толщиной 87,9 г/см<sup>2</sup> и дополнительный фильтр из серы толщиной 34,6 г/см<sup>2</sup> для подавления нейтронов с энергией 144 кэВ, а также фильтр из титана толщиной 7,9 г/см<sup>2</sup> для измерения спектра «фона» (т. е. подавления пика в районе 50—60 кэВ), получили спектр нейтронов «эффекта» с хорошо выделенным пиком с энергией  $55 \pm 5$  кэВ и интенсивностью  $\sim 10^4$  нейтр/см<sup>2</sup>·сек.

Энергетический спектр нейтронов кремниевого пучка с энергией 55 кэВ показан на рис. 5. В табл. 4 приведены относительные интенсивности различных энергетических групп нейтронов для пучков с энергиями  $55 \pm 5$  и  $134 \pm 14$  кэВ, полученных как спектры «эффекта», и нейтронного пучка с энергией 144 кэВ.

Для кремниевых пучков нейтронов фон  $\gamma$ -квантов учтен с помощью измерений с дополнительным тонким водяным фильтром и расчета ослабления  $\gamma$ -квантов и нейтронов этим фильтром.

В заключение авторы выражают искреннюю благодарность Ю. А. Казанскому за ценные

советы и обсуждение результатов измерений, а также А. Ф. Гамалию за любезно предоставленный фильтр кремния.

Поступила в Редакцию 11/IV 1973 г.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Simpson O., Miller L. Nucl. Instrum. and Methods, 1968, v. 61, p. 245.
2. Бродер Д. Л. и др. Препринт ФЭИ-200, Обнинск, 1971.
3. Simpson O. e.a. Proc. of the Third Conf. on Neutron Cross Section and Technology. CONF-710301. Knoxville, 1971, v. 2, p. 598.
4. Bennett E. Nucl. Sci. and Engng, 1967, v. 27, p. 16.
5. Benjamin P. e.a. Nucl. Instrum. and Methods, 1968, v. 59, p. 77.
6. Letourneau R. e.a. Nucl. Instrum. and Methods, 1969, v. 70, p. 106.
7. Кузин Е. П. и др. Препринт ФЭИ-291. Обнинск, 1971.
8. Ланцош К. Практические методы прикладного анализа. М., Физматгиз, 1961, с. 327.
9. Werle H. e.a. Nucl. Instrum. and Methods, 1969, v. 72, p. 111.