

P13-2002-249

А. И. Куклин, Г. Н. Бобарькина, А. А. Богдзель,  
В. И. Горделий, А. Х. Исламов, В. Ю. Коновалов,  
А. Д. Рогов, М. Флорек

**ИЗМЕРЕНИЕ И РАСЧЕТ МЕТОДОМ МОНТЕ-КАРЛО  
СПЕКТРА ПУЧКА НЕЙТРОНОВ.  
ПАРАМЕТРЫ ПУЧКА  
МАЛОУГЛОВОЙ УСТАНОВКИ ЮМО  
НА 4-М КАНАЛЕ РЕАКТОРА ИБР-2**

Направлено в журнал «Приборы и техника эксперимента»

## 1. Введение

Значения абсолютных потоков тепловых нейтронов и их спектр на реакторных пучках необходимы для проектирования, оптимизации параметров и модернизации установок, предназначенных для изучения структуры вещества методами рассеяния нейтронов. Для определения потока нейтронов используются активационные детекторы, или прямые детекторы, в которых конвертором нейтрон - заряженная частица служит одна из реакций  $^{10}\text{B}(n,\alpha)$ ,  $^6\text{Li}(n,\alpha)$ ,  $^3\text{He}(n,p)$  или  $^{235}\text{U}(n,f)$ . Прямые детекторы в сочетании с импульсным источником нейтронов (как ИБР-2) позволяют определить не только абсолютное значение интеграла потока, но и спектр нейтронов с хорошей точностью.

В данной работе мы используем метод с применением камер деления, использующих в качестве детектирующего элемента тонкий слой материала, содержащего  $^{235}\text{U}$ . Реакция деления имеет преимущество, выражающееся в большой амплитуде сигнала (десятки МэВ) и в высокой точности данных ( $< 1\%$ ) о сечении  $\sigma_f(E)$  для медленных нейтронов. Этот метод был использован нами для определения абсолютных потоков нейтронов на установке малоуглового рассеяния ЮМО на 4-м канале высокопоточного реактора ИБР-2. Проведенное исследование продемонстрировало надежность и эффективность предложенного метода.

Изучение спектра и получение информации об абсолютных потоках на установке малоуглового рассеяния (ЮМО), размещенной на 4-м канале ИБР-2, имеет важное значение по нескольким причинам. Во-первых, это возможность оценить эффективность детекторной системы установки, во-вторых, провести анализ фоновых условий. Кроме того, такая информация необходима для текущей модернизации спектрометра. Особенностью спектрометра является отсутствие зеркальных нейтронпроводов. Это означает, что из позиции детектора можно "видеть" замедлитель. Прямая видимость замедлителя придает особый вес полученным спектрам.

В 1984 году, практически вместе с пуском реактора, были проведены исследования абсолютных потоков на 4-м канале (Ю.М.Останевич, В.М.Назаров). Полученные тогда результаты: интегральный поток  $(2,7 \cdot 10^7 \pm 0,2)$  н/с·см<sup>2</sup> при

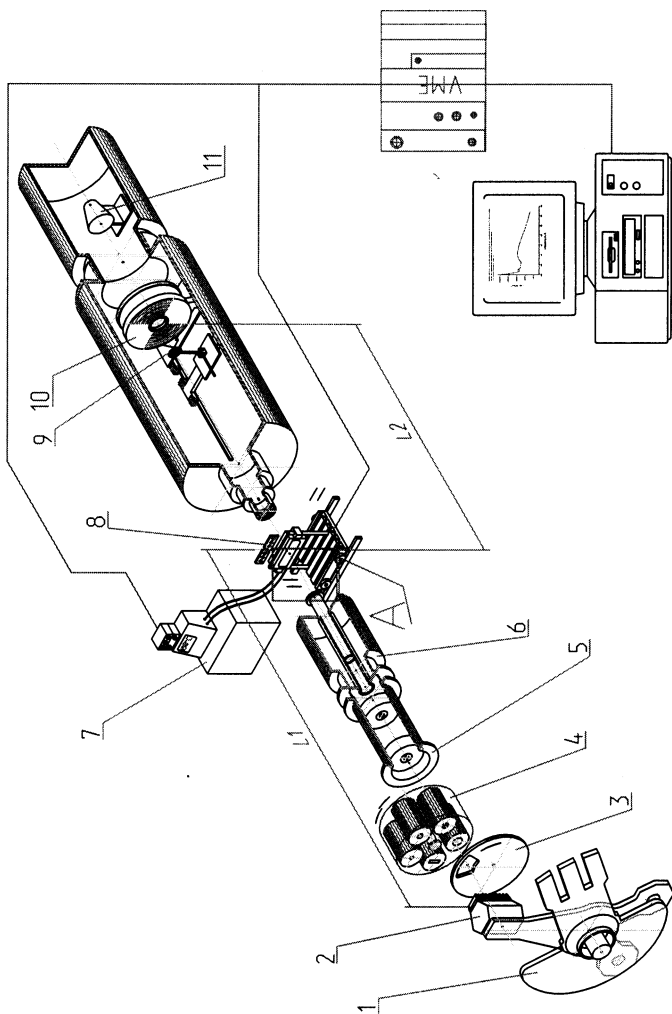


Рис.1. Схема установки во время измерений потоков: 1 — отражатель; 2 — зона реактора и замедлитель; 3 — прерыватель; 4 — первый коллиматор; 5 — вакуумная труба; 6 — второй коллиматор; 7 — термостат; 8 — позиция образца; 9 — ванадиевый стандарт; 10 — детектор рассеянных нейтронов; 11 — детектор прямого пучка; А — место установки камер деления (см. рис.2)

размере 1-го (сменного) коллиматора 100 мм на пролетной базе 18,74 м. Поток при длине волны нейтронов 6 Å составлял  $0,4 \cdot 10^4$  н/с·Å·см<sup>2</sup>. Измерения проводились методом активации Au-фольги при мощности реактора 1,84 кВт, а приведенный выше результат был получен пересчетом мощности на 2 МВт. Опубликованные в [1] данные получены при мощности 400 кВт и затем пересчитаны на 2 МВт. С тех пор установка существенно изменена, в частности, что очень важно, произведена замена 2-го коллиматора, установлен прерыватель, изменена конфигурация отдельных узлов.

## 2. Методика измерений

### 2.1. Условия эксперимента

Измерения камерами деления абсолютных потоков на установке ЮМО (4й канал ИБР-2) проводились в течение года, начиная с января 2000 года. Расположение основных узлов и размещение камеры на установке показаны на рис.1 и 2. На рис.2 крупным планом показано место размещения камеры деления, обозначенное на рис.1 как А. Расстояние от водяного замедлителя до камеры

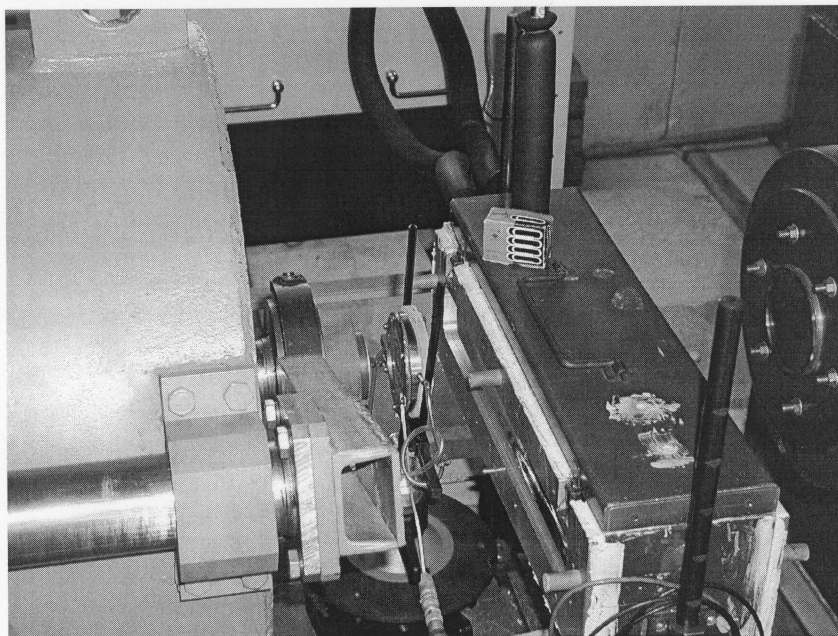


Рис.2. Общий вид камеры деления в процессе эксперимента

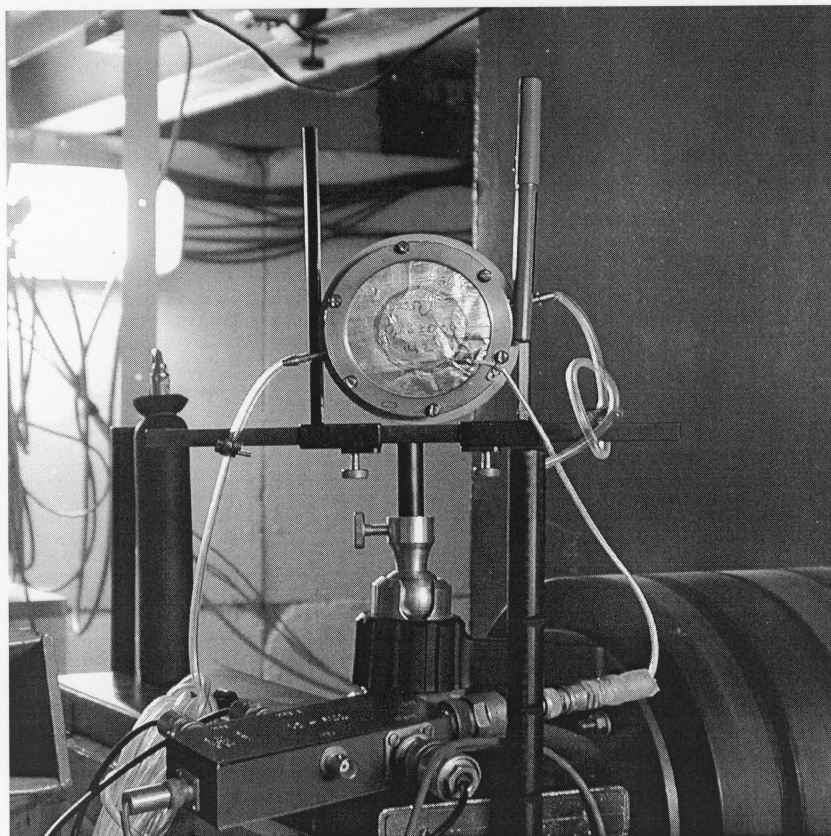


Рис.3. Общий вид первой камеры деления

деления было 17,8 м. Это расстояние соответствует расстоянию поверхность замедлителя – образец. Мощность реактора в период измерений - 1,5 МВт. Для измерений использовались 2 камеры деления.

Первая камера деления (рис.3) состоит из алюминиевой фольги, на которую нанесен слой  $^{235}\text{U}_3\text{O}_8$ , диаметром 42 мм, общим весом 0,88 мг (по урану). Система сбора данных была интегрирована в стандартную схему измерения на установке, и, кроме того, параллельно велись измерения амплитудного спектра для контроля за параметрами камеры. Прокачка метаном камеры не производилась из-за короткого времени эксперимента. И, как видно из амплитудных спектров, не было изменений параметров во время эксперимента.

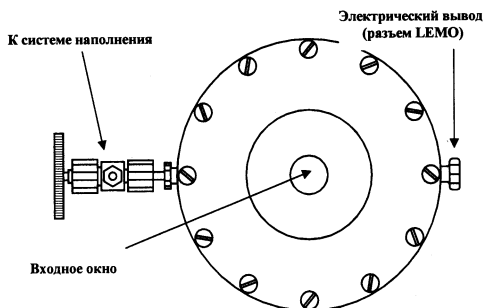


Рис. 4. Внешний вид второй камеры деления

Вторая камера деления показана на рис.4. Конструкция детектора представляет собой плоско-параллельную дисковую ионизационную камеру с внутренним диаметром 90 мм и глубиной 12 мм. В середине камеры, на тефлоновых изоляторах, крепится анод, состоящий из двух пластин толщиной 0,1 мм каждая. Между ними зажата мишень из  $^{235}\text{U}$ . Анод представляет собой кольцо с внешним диаметром 48 мм и внутренним диаметром 10 мм. Внутренний диаметр задает размер чувствительной площади камеры. Катодом являются передняя и задняя стенки корпуса камеры. Корпус камеры и анод изготовлены из нержавеющей стали. Толщина передней и задней стенок равна 1 мм, но в центре имеется углубление диаметром 14 мм, где толщина стенки 0,1 мм. В качестве рабочего газа использовался метан при давлении 1 атм. Чувствительным элементом детектора является тонкий ( $\sim 50 \text{ мг/см}^2$ ) слой  $^{235}\text{UF}_4$ , диаметром 10 мм. Содержание  $^{235}\text{U} < 0.1\%$ . Количество ядер  $^{235}\text{U}$  определялось в измерениях альфа-активности слоя в двойной прецизионной искровой камере с сетками. Измерение количества ядер  $^{235}\text{U}$  в слое дало величину  $N = (1,02 \pm 0,03) \cdot 10^{17}$  ядер. На анод подавалось напряжение  $-300 \text{ В}$ .

Электроника для камеры деления состоит из зарядочувствительного предусилителя, находящегося рядом с камерой, и приемного блока обработки сигнала, расположенного в крейте КАМАК на удалении 15 - 20 м от монитора. В приемном блоке находятся спектрометрический усилитель с регулируемым коэффициентом усиления, амплитудный дискриминатор и источник высоковольтного напряжения.

Параллельно велись измерения всеми детекторами ЮМО - мониторным, детектором рассеяния (за исключением 1-го кольца) и детектором прямого пучка

с целью учесть неконтролируемые параметры (например, быстрые изменения мощности реактора). Были проведены измерения с разными коллимациями как сменного (первого), так и юстируемого коллиматора (второго, см. рис.1). Во время эксперимента для двух экспозиций с длительностью 2500 и 5000 стартов была использована ширина временного канала 16 мкс (рис.5). Для всех остальных спектров время измерения составляло 2500 стартов, а ширина временного канала была 128 мкс.

## 2.2. Определение абсолютных потоков

Сечение деления  $^{235}\text{U}$ , используемое для вычисления абсолютных потоков, описывается в диапазоне энергий тепловых нейтронов формулой [3]

$$\sigma = 583 \sqrt{\frac{0.0253}{E}}, \quad (1)$$

где  $\sigma$  - сечение деления в б,  $E$  - энергия в эВ. Переписав эту формулу в длинах волн, получим

$$\sigma(\lambda) = 324.3 \cdot \lambda, \quad (2)$$

где сечение по-прежнему в барнах, а  $\lambda$  - длина волны в ангстремах.

Эффективность камеры деления ( $\varepsilon$ ) определяется из

$$\varepsilon = 1 - \exp(-N\sigma(\lambda)), \quad (3)$$

где  $N$  - число атомов на пути нейтронного пучка, нормированное на площадь. Для малых значений показателя экспоненты уравнение (3) можно переписать

$$\varepsilon = N\sigma(\lambda). \quad (4)$$

Счет на детекторе  $I$  определяется формулой

$$I = I_0 \varepsilon(\lambda), \quad (5)$$

где  $I_0$  - поток на детекторе ( $\text{н/сек} \cdot \text{см}^2$ ), а  $\varepsilon(\lambda)$  - эффективность детектора.

Подставив (4) в (5), получим:

$$I_0 = \frac{I}{N\sigma(\lambda)}. \quad (6)$$

Длина волны определялась из уравнения

$$\lambda = \frac{3,956 \cdot (t - t_3)}{L}, \quad (7)$$

где  $\lambda$  - длина волны нейтрона в ангстремах,  $L$  - расстояние между поверхностью замедлителя и камерой деления в мм,  $t$  - время пролета в мкс, полученное умножением ширины канала на номер канала,  $t_3$  - время задержки, определяемое как разница между началом канальной развертки и "вспышкой" реактора.

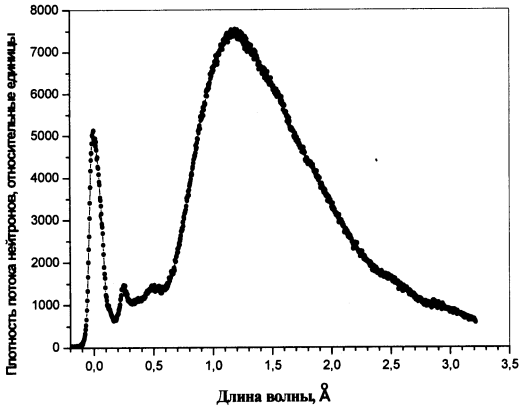


Рис.5. Зависимость плотности потока нейтронов на установке ЮМО (на месте образца - 17,8 м от поверхности замедлителя) от длины волны при ширине временного канала 16 мкс (без учета эффективности детектора)

Для времяпролетной методики (ВПМ) необходимо знать точное время задержки. Это время было определено по переднему фронту нарастания сигнала от быстрых нейтронов из спектра измеренного с шириной временного канала 16 мкс (рис.5) и составило  $(1958 \pm 16)$  мкс.

### 3. Результаты и обсуждение

#### 3.1. Ошибки в определении спектра

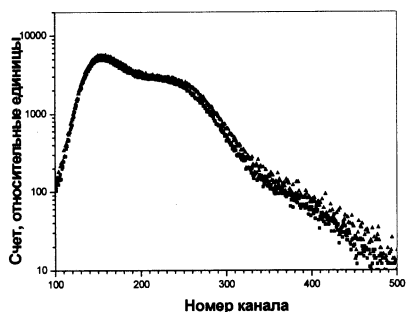
Для получения достоверного результата необходимо учесть следующие факторы, влияющие на измерения:

- мертвое время детектора;
- неоднородность нанесенного слоя камеры деления;
- изменение параметров камеры в процессе измерения;
- колебание мощности реактора;
- потери энергии осколков  $^{235}\text{U}$  в чувствительном слое камеры;
- статистические ошибки.

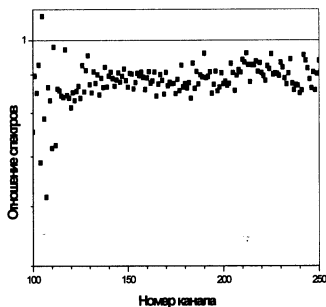


**Влияние мертвого времени детектора** было оценено с помощью изменения загрузки детектора путем изменения диаметра первого коллиматора. Кроме того, поскольку пиковая мощность на два порядка выше, чем средняя, то по максимуму в максвелловском распределении можно оценить просчеты, связанные с мертвым временем детектора [3]. Просчеты из-за мертвого времени для первой камеры составляли около 10%.

**Влияние неоднородности нанесенного слоя** для первой камеры проверялось смещением центра нанесенного слоя  $^{235}\text{U}_3\text{O}_8$  относительно пучка нейтронов. Смещение производилось при коллимации (диаметр) 100 мм (сменный коллиматор) и 14 мм (диаметр юстируемого, ближнего к камере коллиматора). Сканировали 3 раза вдоль горизонтальной плоскости по 12 точек с шагом 5 мм: первое сканирование на 7 мм выше геометрического центра чувствительной части детектора, второе – вдоль центра, и, наконец, третье – на 7 мм ниже геометрического центра детектора. Таким образом, получено 36 точек для определения неоднородности распределения нанесенного слоя. Из этих данных следует, что неоднородность слоя  $^{235}\text{U}_3\text{O}_8$  меняет оценку общей интенсивности не более чем на 10% относительно значения соответствующего однородному распределению слоя урана.



а)



б)

Рис.6. а) Амплитудный спектр сигналов с камеры деления в начале и в конце (через 6 ч) измерений, б) – отношение двух спектров

С учетом этого эффективность первой камеры рассчитывалась исходя из предположения об однородности нанесенного слоя. Для второй камеры неоднородность нанесения слоя не учитывалась из-за того, что чувствительная область камеры меньше размера пучка.

**Изменениями параметров камеры** в процессе измерения можно пренебречь, поскольку амплитудный спектр (а его запись велась параллельно основным измерениям) не менялся во время измерений.

На рис.6 приведены 2 амплитудных спектра: для первого и последнего по времени измерений. Коллимация была разной, и на рис.6 приведено отношение этих спектров. Пересчитанное из коллимационных поправок отношение и приведенное значение на рис.6, б совпадают с точностью до статистической ошибки.

**Мощность реактора** во время измерений практически не изменялась и в соответствии с монитором реактора равнялась  $(1,536 \pm 0.003)$  МВт. Измерения мощности реактора проводились с 10-минутной экспозицией. Всего получена 51 контрольная точка по мощности реактора за время эксперимента. Влияние прерывателя и несоосность установки коллиматоров в результате смены одного размера другим можно отследить по монитору, установленному на отметке 17 м между нейтроноводом 5 и юстируемым коллиматором 6 (см.рис.2). Ошибка измеренной интенсивности составила менее 1%.

**Потери энергии осколков**  $^{235}\text{U}$  в слое  $^{235}\text{U}_3\text{O}_8$  моделировались методом Монте-Карло. Установлено, что эффективность регистрации осколков при пороге дискриминации 5 МэВ составляла  $(92 \pm 1\%)$ . Соответственно, была внесена 8% поправка при расчетах абсолютных значений потоков.

**Статистические ошибки** имеют малый вклад, поскольку интегральный счет определяется практически полностью (см., например, рис.8) максимумом максвелловского распределения, где, как видно из рис. 7, относительная статистическая ошибка – около 0,3%.

Последовательная оценка всех выше приведенных ошибок и просчетов первой камеры приводит к следующему: полученный результат занижен (исходя из формул раздела 2.2) на 31%.

Для второй камеры ошибка измерений интегрального потока нейтронов близка к 5 %. В эту ошибку входят ошибка определения числа ядер (3%), включая потери осколков деления, а также возможный недоучет событий, имеющих амплитуду под порогом дискриминатора и статистическую ошибку.

### 3.2. Спектры и интенсивности

Типичный дифференциальный спектр тепловых нейтронов в позиции образца на установке ЮМО в абсолютных единицах, определенный по методике,

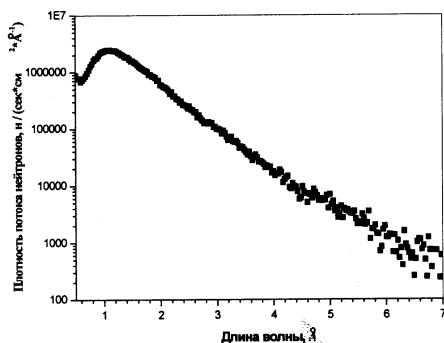


Рис.7. Плотность потока тепловых нейтронов (в абсолютных единицах) на месте образца

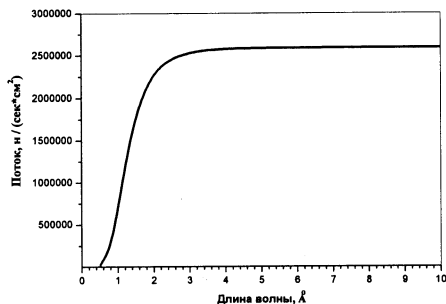


Рис.8. Интегральный поток нейтронов начиная от длины волны 0,5 Å до соответствующей длины волны по оси абсцисс

описанной выше, показан на рис.7. Спектр представлен до значений 7 Å - основного рабочего диапазона длин волн нейтронов данного малоуглового спектрометра. Интегральная интенсивность в абсолютных единицах, полученная с учетом соответствующих поправок, показана на рис.8. Здесь по оси абсцисс отложена длина волны нейтронов в ангстремах, а по оси ординат — интегральный поток от 0,5 Å до соответствующей длины волны. Интегральный поток от 0,5 до 6 Å составил при диаметре сменного (1-го) коллиматора 40 мм —  $2,6 \cdot 10^6$  н/с·см<sup>2</sup> и мощности реактора 1,54 МВт.

При экспериментах на установке ЮМО очень часто используются различные размеры первого (сменного) коллиматора. Поэтому были проведены измерения интенсивностей для разных диаметров этого коллиматора. Результаты представлены на рис.9.

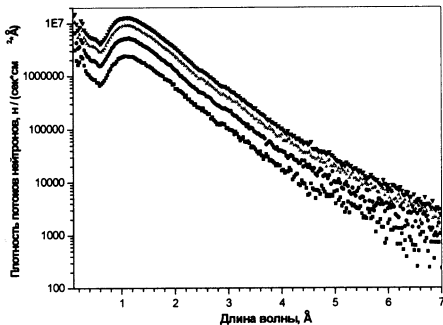


Рис.9. Плотности потоков тепловых нейтронов на образце при разных коллимациях (снизу вверх по интенсивности: диаметр первого коллиматора 40 мм, 60 мм, 80 мм, 100 мм)

большее размера пучка. Данный спектр получен в предположении, что все эти нейтроны вылетают из зоны реактора во время вспышки, т.е. их длина волны может быть измерена по времяпролетной методике. Для запаздывающих нейтронов это утверждение неверно. Поэтому результаты исключительно важны для оценки фона. Конечно же, важнейшей характеристикой нейтронного пучка является плотность потока. В табл. 1 и 2 приведены основные интегральные характеристики, полученные в результате эксперимента.

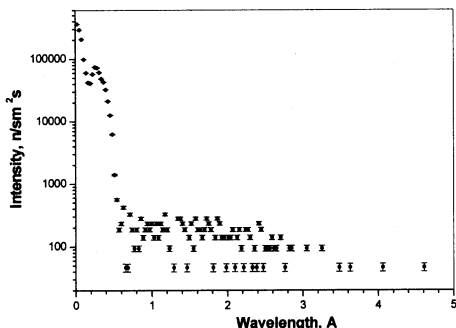


Рис.10. Спектр нейтронов, прошедших сквозь 1 мм кадмиевую пластину.

Одной из важнейших характеристик спектрометра является фон. Для того чтобы составить представление о вкладе нейтронов, создающих фон, был проделан эксперимент с кадмиевой пластиной. На рис.10 показан спектр нейтронов, прошедших сквозь кадмиевую пластину (толщиной 1 мм), поперечный размер которой значительно

Таблица 1. Основные результаты эксперимента (камера 1)  
по определению потоков тепловых нейтронов на месте образца (установка ЮМО)

№ п/п	Диаметр Сменного Коллиматора, мм	Диаметр юстируемого коллиматора, мм	Поток интегральный 0,5-6Å, н/с см <sup>2</sup> W=1,54 МВт	Поток интегральный 2-6Å, W=1,54 МВт	Поток от 0,5 до 6Å, н/см <sup>2</sup> с пересчитанный с учетом поправок 3.1 и мощности W =2 МВт
1	100	14	1,41x10 <sup>7</sup>	1,8x10 <sup>6</sup>	2,5x10 <sup>7</sup>
2	80	14	9,85x10 <sup>6</sup>	1,27x10 <sup>6</sup>	1,7x10 <sup>7</sup>
3	60	14	5,53x10 <sup>6</sup>	7,05x10 <sup>5</sup>	9,4x10 <sup>6</sup>
4	40	14	2,59x10 <sup>6</sup>	3,4x10 <sup>5</sup>	4,4x10 <sup>6</sup>

Таблица 2. Основные результаты эксперимента (камера 2)  
по определению потоков тепловых нейтронов на месте образца на установке  
ЮМО

№ п/п	Диаметр Сменного Коллиматора, мм	Диаметр юстируемого коллиматора, мм	Поток интегральный 0.5-6Å, н/с см <sup>2</sup> , W =1,54 МВт	Поток от 0.5 до 6Å, н/см <sup>2</sup> с, пересчитанный с учетом поправок 3.1 и мощности реактора W =2 МВт
1	100	14	2,03x10 <sup>7</sup>	(2,6 ±0.1)x10 <sup>7</sup>
2	80	14	1,39x10 <sup>7</sup>	(1,81 ±0.09)x10 <sup>7</sup>
3	60	14	7,64x10 <sup>6</sup>	(9,9 ±0.5)x10 <sup>6</sup>
4	40	14	3,58x10 <sup>6</sup>	(4,7 ±0.2)x10 <sup>6</sup>

### 3.3. Расчетные данные по потокам на образце

Интересно сравнить для оценки различных факторов экспериментальные результаты с расчетными. С этой целью были проведены также расчеты по абсолютным потокам на 4-м канале ИБР-2 методом Монте-Карло [6]. На рис. 11 показана схема и основные узлы и размеры установки, использованные при расчетах. Модель, представленная на рис.11, включает все узлы установки,

влияющие на поток. Сравнение расчетных нейтронных потоков и полученных экспериментально демонстрирует хорошее согласие (рис.15).

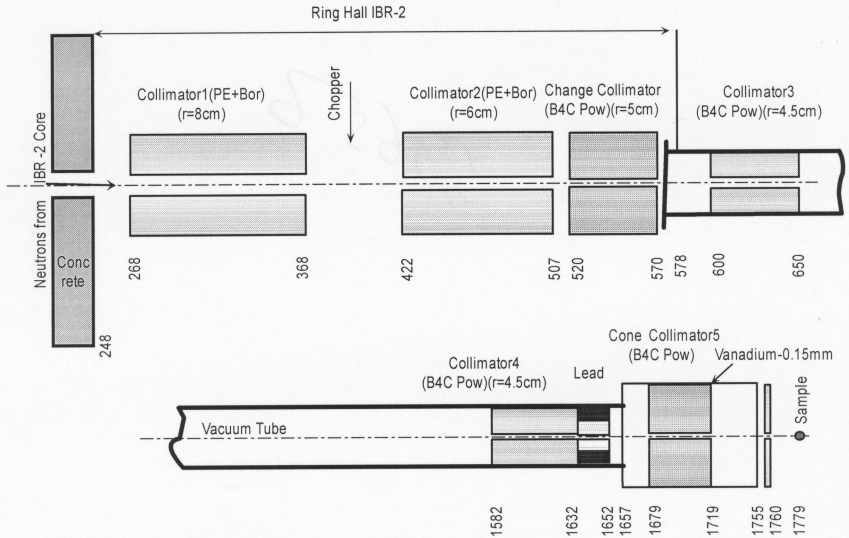


Рис.11. Схема установки, использованная как модельная для расчетов методом Монте-Карло

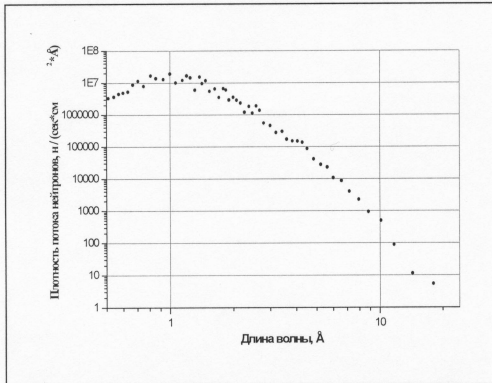


Рис.12. Полученный методом Монте-Карло спектр нейтронного потока на 4-м канале ИБР-2 на месте образца установки ЮМО

На рис.12 представлен рассчитанный спектр и соответствующий интегральный поток на образце на установке ЮМО (рис.1) для максимального размера первого коллиматора (диаметр 100 мм).

03.05.00 18:25:54, calculated data for distance 17.8m

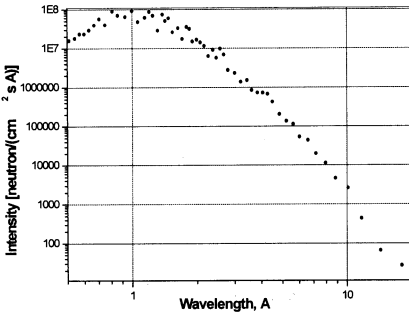


Рис.13. Полученный методом Монте-Карло спектр нейтронного потока на 4-м канале ИБР-2

03.05.00 18:25:54, calculated background data for collimation 100 14

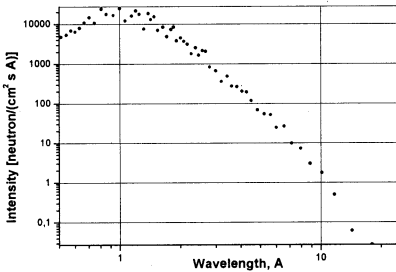


Рис.14. Вычисленный методом Монте-Карло спектр перерассеянных нейтронов

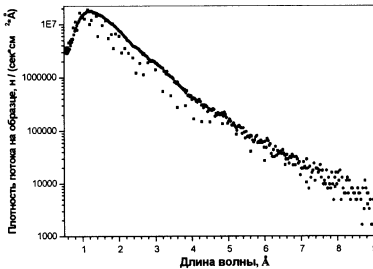


Рис.15. Два спектра: вычисленный методом Монте-Карло и измеренный.

На рис.13 приведен спектр нейтронов на отметке 17,8 м от поверхности замедлителя (что соответствует положению образца на установке ЮМО) для случая, если бы отсутствовали все конструктивные элементы установки. Для оценки максимально возможного потока это исключительно важно.

На рис.14 показан фоновый спектр нейтронов. Это спектр нейтронов, которые хотя бы один раз перерассеялись и попали в на образец. Как видно из сравнения рис.12 и 14, фон в точности повторяет спектр “полезных” нейтронов.

На рис.15 представлены два нормированных спектра: для расчетный и измеренный. Хорошее соответствие между расчетными и измеренными данными показывает надежность расчетных данных по быстрым нейтронам и гамма-фону.

Как уже следует из рис.5, в пучке присутствует большое количество быстрых нейтронов. Трудности с экспериментальным определением плотности потоков быстрых нейтронов связаны прежде всего с определением

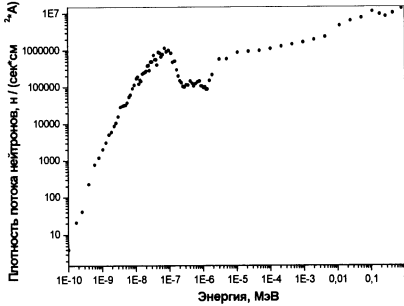


Рис.16. Спектр нейтронов на 4-м канале ИБР-2 (расчет методом Монте-Карло)

эффективности детектора в этой области спектра. Поэтому результаты расчетов по полному спектру пучка, показанные на рис.16, интересны, прежде всего, для модернизации спектрометра. Из спектра (рис.16) можно получить отношение быстрых и промежуточных нейтронов к тепловым, которое составляет 7.6:1.

На рис. 17 приведены расчетные потоки гамма-квантов на образце. Стандартный размер пучка 14 мм, следовательно, полный поток на образце будет

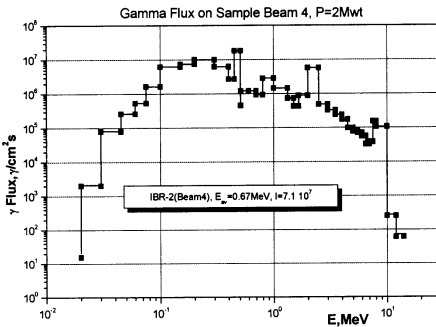


Рис.17. Рассчитанный поток гамма-квантов на образце

в 1,54 раза больше. Известно, что ряд полимеров “сшивается” гамма-квантами определенных энергий, поэтому рис.17 может быть использован для оценки влияния этого фактора и/или ограничения времени эксперимента.

И, наконец, радиационные дозы, которые могут быть получены на образце

(при максимальном размере первого коллиматора):

Доза по гамма -квантам составляет

$$D_{\gamma} = 76 \text{ бэР/ч, или } 0.76 \text{ Зв ;}$$



Доза по быстрым и тепловым нейтронам -  $D_n = 4.99$  бэР/ч, или 49.9 Зв;

Доза по наведенной радиации за счет поглощения в конструктивных элементах установки -  $D_{n,\gamma} = 2.7$  бэР/ч, или 0.027 Зв.

Эти данные имеют исключительно важное значение для оценки радиационных повреждений биологических, полимерных и других исследуемых объектов.

### **Заключение**

В статье представлены метод и результаты измерений абсолютных спектров и потоков тепловых нейтронов на малоугловой установке ЮМО на 4-м канале ИБР-2 с гребенчатым водяным замедлителем. Эксперименты проведены при разных параметрах установки ЮМО: изменялись коллимация, экспозиция, ширина временного окна, устанавливался кадмиевый экран. Приведенные выше результаты находятся в удовлетворительном согласии с измерениями, проведенными в 1984 году. Результаты по оценке потоков, исходя из геометрических данных также находятся в удовлетворительном согласии с другими литературными данными [4,5].

Методом Монте-Карло рассчитаны спектры и потоки для разных размеров коллиматора. Рассчитаны также нейтронные спектры и абсолютные потоки на образце, приведены спектры рассеянных нейтронов, которые формируют нейтронный фон на установке. Впервые рассчитаны и представлены гамма спектры, а также определены радиационные дозы на месте образца.

Экспериментальные данные, полученные в данной работе, могут быть использованы для планирования экспериментов, расчетов сечений рассеяния, фона, а также для оптимизации и модернизации установки ЮМО.

Использованные методики имеют общий характер и могут быть применены для надежного определения абсолютных значений параметров пучков тепловых нейтронов.

Полученные данные будут использованы как при модернизации ЮМО, так и для оценок, например, эффективности детекторов и длительности времени эксперимента.

Авторы благодарят А.В.Белушкина за критические замечания и поддержку, В.Н.Швецова за внимание к эксперименту и помощь, М.П.Коробченко, Г.Ф.Жиронкина за обеспечение условий и аппаратуры для проведения исследований, Ю.С.Замятнина за внимательное чтение черновика статьи и за ценные замечания, С.П.Ярадайкина за полезные замечания и помощь, Л.П.Черненко за чтение статьи и сделанные замечания. Авторы также признательны А.В. Приходько за фотографии отдельных узлов установки.

### *Литература*

[1] Кунченко А.Б. Исследование структуры полимеров с помощью малоуглового рассеяния нейтронов. Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук, Дубна, 1989, с.46.

[2] Yu. M. Gledenov et al. JINR Communication E-3-95-445, Dubna, 1995.

[3] V.Yu.Bezzabotnov and Yu.M.Ostanevich. Solution of some experimental problems met in the time-of-flight small angle neutron scattering. Physica B 156&157 (1989) 595-597.

[4] Е.П.Шабалин. Импульсные реакторы на быстрых нейтронах. Москва, Атомиздат, 1976.

[5] А.Д.Рогов, Е.П.Шабалин. Нейтронно-физические параметры реактора ИБР-2, ОИЯИ, P13-9990, Дубна, 1976.

[6] MCNP – A General Monte-Carlo N-Particle Transport Code, Version 4B, LA-12625, J.F.Breiesmeister, Editor, Los Alamos National Laboratory Report (1997).

Получено 1 ноября 2002 г.

Куклин А. И. и др.

P13-2002-249

Измерение и расчет методом Монте-Карло спектра пучка нейтронов.  
Параметры пучка малоугловой установки ЮМО  
на 4-м канале реактора ИБР-2

Представлены метод и результаты измерений абсолютных спектров и потоков тепловых нейтронов на малоугловой установке ЮМО на 4-м канале ИБР-2 с гребенчатым водяным замедлителем. Эксперименты проведены при разных параметрах установки ЮМО: изменялись коллимация, экспозиция, ширина временного окна, устанавливался кадмиевый экран.

Методом Монте-Карло рассчитаны спектры и потоки для разных размеров коллиматора. Рассчитаны также нейтронные спектры и абсолютные потоки на канале нейтронов, и приведены спектры рассеянных нейтронов, которые формируют нейтронный гамма-фон на установке. Впервые определены радиационные дозы на месте образца.

Экспериментальные данные, полученные в данной работе, могут быть использованы для планирования экспериментов, расчетов сечений рассеяния, фона, а также для оптимизации и модернизации установки ЮМО.

Использованные методики имеют общий характер и могут быть применены для надежного определения абсолютных значений параметров пучков тепловых нейтронов и на других нейтронных установках.

Работа выполнена в Лаборатории нейтронной физики им. И. М. Франка ОИЯИ.

Препринт Объединенного института ядерных исследований. Дубна, 2002

Перевод авторов

Kuklin A. I. et al.

P13-2002-249

Measurement and Simulation of Neutron Beam Spectrum by Monte-Carlo Method. Beam Parameters of Small Angle Spectrometer YuMO at the Fourth Channel of IBR-2

The method and results of the measurements of absolute spectra and fluxes of thermal neutrons at small angle spectrometer YuMO at the fourth channel of the IBR-2 reactor with a comblike water moderator are presented. The experiments were carried out at different parameters of the YuMO instrument, which changes in collimation, exposition and time window width as well as with placement of cadmium screen.

The spectra and fluxes were simulated by the Monte-Carlo method for different collimator sizes. Besides, neutron spectra and absolute fluxes at the neutron channel were calculated. The spectra of the scattered neutrons, which form neutron and gamma background at the spectrometer, were given. For the first time the radiation doses in the sample place were determined.

The experimental data obtained in this work can be used for experiment planning, for the calculations of scattering cross-section and background, and also for optimization and modernization of the YuMO instrument.

The used methods have common character and can be used for reliable determination of the absolute values of thermal neutron beams at other neutron instruments as well.

The investigation has been performed at the Frank Laboratory of Neutron Physics, JINR.

Preprint of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna, 2002

Редактор *М. И. Зарубина*  
Макет *Н. А. Киселевой*

Подписано в печать 10.12.2002.

Формат 60 × 90/16. Бумага офсетная. Печать офсетная.  
Усл. печ. л. 1,13. Уч.-изд. л. 1,25. Тираж 315 экз. Заказ № 53656.

Издательский отдел Объединенного института ядерных исследований  
141980, г. Дубна, Московская обл., ул. Жолио-Кюри, 6.

E-mail: [publish@pds.jinr.ru](mailto:publish@pds.jinr.ru)  
[www.jinr.ru/publish/](http://www.jinr.ru/publish/)