

УДК 539.16.07,539.1.03

## ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК НЕЙТРОННОГО ПУЧКА ПЕРВОГО КАНАЛА РЕАКТОРА ИБР-2

© 2019 г. В. Л. Кузнецов<sup>1,2</sup>, Е. В. Кузнецова<sup>1,\*</sup>, П. В. Седышев<sup>1</sup>, А. П. Сиротин<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт ядерных исследований РАН, 117312 Москва, Россия

<sup>2</sup>Объединенный институт ядерных исследований, 141980 Московская область, Дубна, Россия

\*E-mail: [evgenia@inr.ru](mailto:evgenia@inr.ru)

Поступила в редакцию 25.12.2018 г.

После доработки 23.01.2019 г.

Принята к публикации 12.02.2019 г.

Выполнены исследования временных характеристик времяпролетного спектрометра, установленного на первом канале реактора ИБР-2. Обнаружено изменение времени вспышки реактора относительно импульса старта в зависимости от времени измерения с начала цикла работы реактора. Измерено время замедления нейтронов в зависимости от длины волны нейтрона. Установлена зависимость полуширины рефлексов от длины волны нейтрона. Измерения велись в широком диапазоне углов Брэгга от 0.0567232 до 0.34180977 рад (от  $\sim 3^\circ$  до  $\sim 19^\circ$ ). Сделана оценка мозаичности монокристалла.

**Ключевые слова:** времяпролетный спектрометр, двухосный дифрактометр, ширина нейтронного импульса, импульсный реактор.

**DOI:** 10.1134/S0207352819100135

### ВВЕДЕНИЕ

В работах [1, 2] были представлены результаты измерений времени вылета нейтронов из водородных замедлителей и ширины нейтронного импульса в зависимости от энергии нейтронов. Время вылета нейтронов меняется от 6 до 102 мкс в зависимости от конструкции замедлителя и от энергии вылетающих нейтронов. В области эпитепловых нейтронов время вылета нейтронов равносильно увеличению пролетной базы на 28 мм [3].

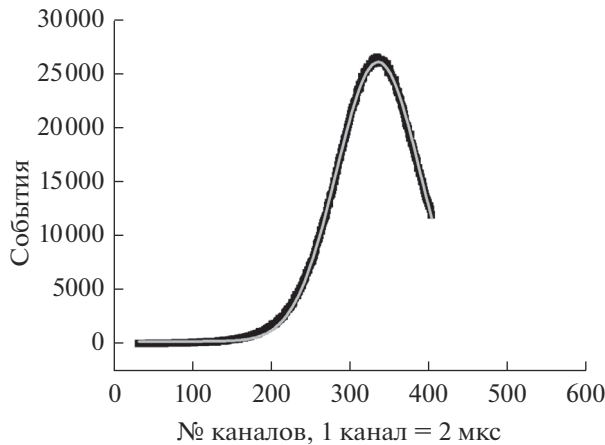
Для того чтобы получить точные измерения параметров низко лежащих ядерных резонансов [4], нами были проведены исследования временных характеристик пучка нейтронов первого канала импульсного реактора ИБР-2.

### МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

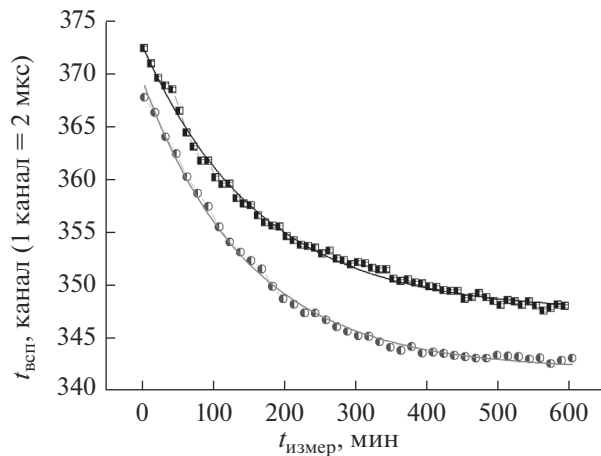
Эксперименты проводились на двухосном дифрактометре, установленном на 30-метровой базе первого канала импульсного реактора ИБР-2 [5]. Монокристалл бромида калия размером  $60 \times 60 \times 14$  мм был установлен узкой гранью на столик гониометрической головки ГСК-100. Повороты столика гониометрической головки осуществлялись с помощью шаговых двигателей с точностью 100 шагов на градус. Консоль длиной 2200 мм, на которой располагалась установка  $\theta-2\theta$  (вторая ось дифрактометра), передвигалась

с помощью отдельного шагового двигателя. Поворот консоли осуществлялся с точностью 628 шагов на градус.

С помощью системы коллиматоров был сформирован пучок нейтронов с поперечным сечением  $24 \times 24$  мм и угловой расходимостью  $3.3 \times 10^{-3}$  рад, который падал на монокристалл KBr, установленный под углом  $\theta$  в геометрии Лауэ. Пучок нейтронов дифракции, отраженный плоскостями {200}, регистрировался детектором нейтронов, установленным под углом  $2\theta$ . В качестве детектора нейтронов использовались счетчики СНМ-18, работающие в пропорциональном режиме. Сигнал с детектора поступал в быстрый предусилитель, потом дополнительно усиливался и формировался быстрым усилителем. Сигнал с быстрого усилителя поступал на дискриминатор, который, в свою очередь, формировал импульс в стандарте NIM. Для регистрации времяпролетных спектров использовалась система сбора и накопления спектров "TIMECODER", разработанная в ЛНФ ОИЯИ [6]. Сигнал с дискриминатора подавался на один из детекторных входов многостопового восьми канального время-цифрового преобразователя (ВЦП) системы накопления. Старт системы ВЦП осуществлялся штатным стартовым импульсом реактора ИБР-2, который поступал за 3 мс до максимума импульса мощности реактора.



**Рис. 1.** Параметры нейтронной вспышки, аппроксимированной функцией Гаусса. Время центра тяжести вспышки относительно импульса старта равно 3124.7 мкс, длительность – 212 мкс.



**Рис. 2.** Время вспышки в зависимости от времени начала работы реактора.

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВРЕМЕНИ ВСПЫШКИ ВО ВРЕМЯПРОЛЕТНОМ СПЕКТРЕ

Вспышка быстрых нейтронов и  $\gamma$ -квантов отчетливо видна во времяпролетном спектре нейтронов дифракции. На рис. 1 представлен фрагмент времяпролетного спектра со вспышкой быстрых нейтронов,  $\gamma$ -квантов и результаты его аппроксимации с помощью распределения Гаусса. Первые пять каналов по 500 мкс, остальные по 2 мкс.

Аппроксимация фрагмента вспышки импульсного реактора распределением Гаусса хорошо описывает положение ее максимума и полуширину (как было показано в работах [7, 8]). При обработке результатов измерений было обнаружено изменение времени вспышки и рефлексов относительно старта. Результаты обработки представлены на рис. 2, на котором видно, что время

вспышки относительно старта реактора меняется по закону:

$$t_{\text{flash}} = t_0 + D_t \exp(-t_{\text{meas}}/t), \quad (1)$$

где  $t_{\text{flash}}$  – время вспышки,  $t_0$  – асимптотическое значение времени вспышки,  $D_t$  – параметр,  $t_{\text{meas}}$  – время измерения от начала цикла,  $t$  – параметр спада.

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВРЕМЕНИ ВСПЫШКИ ПО РЕФЛЕКСАМ РАЗЛИЧНЫХ ПОРЯДКОВ

Длина волны нейтронов дифракции, согласно закону Брэгга, равна:

$$n\lambda = 2d_{hkl}\sin\theta, \quad (2)$$

где  $n$  – порядок отражения,  $\lambda$  – длина волны нейтрона,  $d_{hkl}$  – расстояние между плоскостями  $\{hkl\}$ ,  $\theta$  – угол Брэгга.

С другой стороны, длина волны нейтрона при дифракции во времяпролетном спектре пропорциональна времени пролета:

$$\lambda = 3.956t/L, \quad (3)$$

здесь  $t$  – время пролета нейтронов дифракции в мкс,  $L$  – пролетная база в мм. Наблюдаемые времена рефлексов разных порядков имеют вид:

$$t_n = t_1/n + t_0, \quad (4)$$

где  $t_n$  – наблюдаемое время рефлекса  $n$ -го порядка,  $t_1$  – время пролета нейтронов дифракции первого порядка,  $n$  – порядок дифракции,  $t_0$  – время вспышки нейтронов. Все времена считаются от импульса старта.

Используя результаты измерений времяпролетных спектров нейтронов дифракции для рефлексов первого, второго и третьего порядков, имеем:

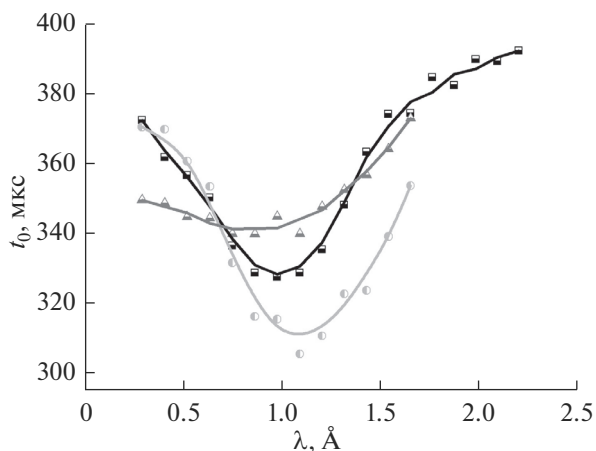
$$t_0 = 2t_2 - t_1, \quad (5.1)$$

$$t_0 = (3t_3 - t_1)/2, \quad (5.2)$$

$$t_0 = (3t_3 - 2t_2). \quad (5.3)$$

На рис. 3 представлено время нейтронной вспышки, определенной по формулам (5), в зависимости от длин волн нейтронов дифракции для рефлексов первого порядка – черные квадраты (5.1), второго порядка – светло серые кружки (5.2) и третьего порядка – серые треугольники (5.3).

Таким образом, как следует из рис. 3, время вспышки зависит от длины волны нейтронов (чего не должно быть). Это связано с тем, что не было учтено время замедления и вылета нейтронов из замедлителя. Эффективно задержка вспышки нейтронов определяется временем замедления и временем вылета нейтронов определенной длины волны [9], поэтому ко времени вспышки быстрых нейтронов надо прибавить время замедления и время вылета нейтронов конкретной длины волны.



**Рис. 3.** Время вспышки нейтронов, определенное по формулам (5), в зависимости от длин волн нейтронов при дифракции для рефлексов первого порядка (в геометрии Брэгга) – черные квадраты (5.3), второго порядка – светло серые кружки (5.2) и третьего порядка – серые треугольники (5.3).

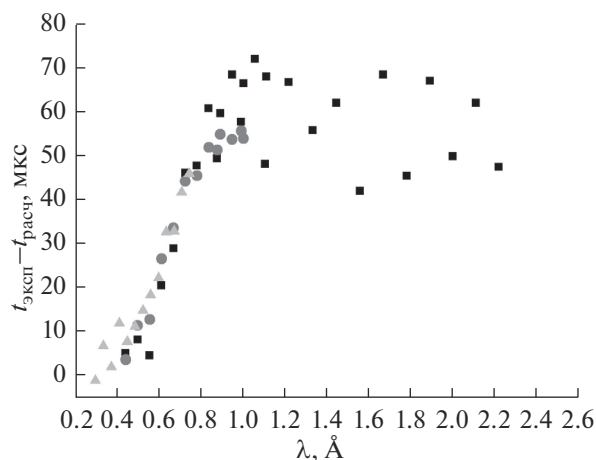
Была построена зависимость времени пролета от длины волны нейтрона в виде  $(t_i - t_0) = \lambda_i \times L/3.956$  непосредственно после измерений времяпролетных спектров нейтронов дифракции в монокристалле бромида калия. Измерения велись в широком диапазоне углов Брэгга от 0.0567232 до 0.34180977 рад (от  $\sim 3^\circ$  до  $\sim 19^\circ$ ). Время вспышки  $t_0$  было определено по результатам аппроксимации времяпролетного спектра вспышки, а время регистрации рефлекса  $t_i$  определялось по результатам аппроксимации фрагмента времяпролетного спектра самого рефлекса.

Определение времени задержки вылета нейтронов из замедлителя проводилось с использованием монокристалла, с помощью которого формировался пучок нейтронов дифракции с определенной длиной волны, и вычислялось время пролета этих нейтронов  $t_{cul}$ . Время замедления и вылета нейтронов из замедлителя при этом равнялось:

$$\Delta t = (t_i - t_0) - t_{cul} \quad (6)$$

Здесь  $t_i$  – время регистрации рефлекса  $i$ -го порядка,  $t_0$  – время вспышки, полученное аппроксимацией функцией Гаусса фрагмента времяпролетного спектра вспышки (как показано выше),  $t_{cul}$  – время пролета нейтронов, вычисленное из измеренного угла Брэгга, оцененной длины пролетной базы  $L = 28040$  мм и известного  $2d_{200} = 6.59$  Å по формулам (2) и (3).

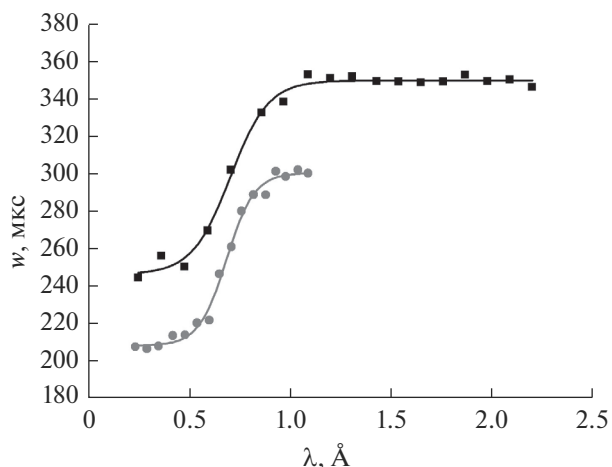
На рис. 4 представлена зависимость времени замедления и вылета нейтронов из замедлителя  $\Delta t$  от длины волны регистрируемых нейтронов дифракции.



**Рис. 4.** Зависимость времени замедления и вылета нейтронов из замедлителя от длины волны нейтронов. Черные квадраты – время пролета нейтронов, соответствующих рефлексу первого порядка, серые кружки – время пролета нейтронов, соответствующих рефлексу второго порядка, светло серые треугольники – время пролета нейтронов, соответствующих рефлексу третьего порядка.

Время замедления и вылета нейтронов сравнительно быстро увеличивается в области длин волн нейтронов 0.3–1.0 Å, а, начиная с длины волны нейтрона примерно 1 Å, остается практически постоянным вплоть до 2.2 Å. Нейтроны замедляются до этой области длин волн и вылетают из замедлителя одновременно. Такая зависимость может быть связана с зависимостью сечения рассеяния нейтронов на водороде [10, 11].

На рис. 5 приведена измеренная ширина рефлексов первого и второго порядков в зависимости от их длины волны, полученных аппроксимацией рефлексов функцией Гаусса. Черные квадраты и черная линия – рефлексы первого порядка



**Рис. 5.** Зависимость полуширины рефлекса, аппроксимированного Гауссом, от длины волны нейтрона. Черные квадраты соответствуют рефлексам первого порядка, серые кружки – рефлексам второго порядка.

отражения, серые кружки и линия – рефлексы второго порядка отражения. Различие ширины для рефлексов первого и второго порядков отражения связано с различием дифракционного уширения.

Ширина рефлексов имеет вид:

$$\Delta t = ((\Delta t_{f1})^2 + (\Delta t_i)^2)^{0.5}, \quad (7)$$

здесь  $\Delta t_{f1}$  – ширина, обусловленная вспышкой реактора,  $\Delta t_i$  – дифракционное уширение  $i$ -го порядка. Дифракционное уширение, обусловленное расходимостью нейтронного пучка  $\Delta\theta_n$  и мозаичностью монокристалла  $\Delta\theta_m$ , имеет вид [10]:

$$\Delta t_i = g\lambda \text{ctg}(\theta)((\Delta\theta_n)^2 + (\Delta\theta_m)^2)^{0.5}, \quad (8)$$

где  $g = L/3.956$  – коэффициент, связывающий согласно (3) время пролета и длину волны нейтрона.

Произведение  $g\lambda \text{ctg}(\theta)$  – медленно убывающая функция в области углов (0.04–0.18) рад, поэтому резкое увеличение полуширины рефлекса в области длин волн нейтронов (0.3–1.0) Å связано с процессом замедления нейтронов. В этой же области длин волн нейтронов происходит увеличение времени замедления нейтронов. Разность квадратов ширины рефлексов первого и второго порядков дифракции позволяет исключить  $(\Delta t_{f1})^2$  и получить оценку мозаичности монокристалла равную  $(4.4–6.5) \times 10^{-3}$ .

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выполнены исследования временных характеристик времяпролетного спектрометра, установленного на 30-метровой времяпролетной базе первого канала реактора ИБР-2.

Обнаружено изменение времени импульса мощности реактора относительно импульса старта, в зависимости от времени измерения с начала цикла работы реактора.

Время вспышки меняется относительно начала работы реактора по закону распада с постоянной времени, равной  $\approx 140–160$  мин.

Измерено время замедления нейтронов в зависимости от длины волны нейтронов.

Установлена зависимость полуширины рефлексов от длины волны нейтрона.

Сделана оценка мозаичности монокристалла.

### БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают глубокую благодарность В.Н. Швецову, Е.В. Лычагину, Ю.Н. Копачу, М.И. Цулая, В.В. Новицкому, Э.А. Коптелову за полезные обсуждения и поддержку работы.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Graham K.F., Carpenter J.M.* // Nuclear Science and Engineering. 1972. V. 49. P. 416.
2. *Tetsuya Kai, Makoto Teshigavara, Hoboru Watanabe et al.* // J. Nucl. Science and Technology. 2002. V. 39. № 2. P. 120.
3. *Уинздор К.* Рассеяние нейтронов от импульсных источников. М.: Изд-во Энергоатомиздат, 1985. С. 352.
4. *Kagan Yu., Afanas'ev A.M.* // Soviet Phys. JETP. 1966. V. 23. № 1. P. 178.
5. *Alexandrov Yu.A., Chalupa B., Eichhorn F. et al.* // Physica B. 1988. V. 151. P. 108.
6. *Shvetsov V.N., Alpatov S.V., Astakhova N.V. et al.* // Instruments and Experimental Techniques. 2012. V. 55. № 5. P. 561.
7. *Бондаренко И.И., Стависский Ю.Я.* // АЭ. 1959. Т. 7. Вып. 5. С. 417.
8. *Бондарченко Е.А., Пенельшев Ю.Н., Попов А.К.* // ЭЧАЯ. 2004. Т. 35. Вып. 4. С. 927.
9. *Александров Ю.А., Шаранов Э.И., Чер Л.* Дифракционные методы в нейтронной физике. М.: Энергоиздат, 1981. С. 216.
10. *Балагуров А.М.* // ЭЧАЯ. 1992. Т. 23. Вып. 4. С. 1088.
11. <http://www.nndc.bnl.gov/ENDF>

## Investigation of the Characteristics of the Neutron Beam of the First Channel of the IBR-2 Reactor

V. L. Kuznetsov, E. V. Kuznetsova, P. V. Sedyshev, A. P. Sirotin

The temporal characteristics of the time-of-flight spectrometer installed on the first channel of the IBR-2 reactor are investigated. A change in the flare time of the reactor relative to the start was detected. The neutron deceleration time is measured as a function of the neutron wavelength. The dependence of the half-width of the reflections on the neutron wavelength is established. Measurements were carried out in a wide range of Bragg angles from 0.0567232 to 0.34180977 radians (from  $\sim 3^\circ$  to  $\sim 19^\circ$ ). An estimate is made for the mosaic pattern of a single crystal.

**Keywords:** time-of-flight spectrometer, biaxial diffractometer, neutron pulse width, pulsed reactor.