

Характеристики спектрометра ДИН-2ПИ с нейтронным концентратором

© И.В. Калинин,¹ В.М. Морозов,¹ А.Г. Новиков,¹ А.В. Пучков,¹ В.В. Савостин,¹ В.В. Сударев,¹ А.П. Булкин,² С.И. Калинин,² В.М. Пусенков,² В.А. Ульянов²

¹ Физико-энергетический институт им. А.И. Лейпунского, Обнинск, Россия

² Санкт-Петербургский институт ядерной физики им. Б.П. Константина НИЦ „КИ“, 188300 Санкт-Петербург, Россия
e-mail: puchkov@ipre.ru

(Поступило в Редакцию 17 июля 2013 г.)

Приведены основные характеристики модернизированного спектрометра ДИН-2ПИ. На основании анализа экспериментальных данных и численных расчетов сделан вывод, о том, что оснащение спектрометра ДИН-2ПИ суперзеркальным нейтронным концентратором увеличило плотность потока холодных нейтронов на образце почти на порядок. Применение гребенчатого замедлителя в канале № 2 и модернизации активной зоны реактора ИБР-2М увеличило плотность потока на образце еще примерно на 40%.

Спектрометр ДИН-2ПИ зарекомендовал себя как надежный и удобный инструмент для исследования структурно-динамических свойств конденсированных сред в широком диапазоне температур. Отличные фоновые условия, обеспечиваемые системой двух вращающихся коллиматоров [1], сочетаются в нем с разрешающей способностью, находящейся на уровне лучших зарубежных аналогов. Однако его важнейшим недостатком являлась низкая плотность потока нейтронов на образце, при том что реактор ИБР-2 является самым интенсивным импульсным источником медленных нейтронов в мире. Кроме того, с точки зрения разрешения наиболее привлекательной областью энергий является область холодных нейтронов (менее 5 meV), доля которых в общем спектре тепловых нейтронов в случае замедлителя комнатной температуры составляет лишь малую часть. Причины, объясняющие это обстоятельство, состоят в том, что практически все зарубежные аналоги ДИН-2ПИ оборудованы устройствами, позволяющими увеличить плотность потока холодных нейтронов за счет использования криогенных замедлителей и зеркальных нейтронотов. Поэтому период остановки реактора ИБР-2 для замены активной зоны (2007–2011 г.) был использован нами для реконструкции первой пролетной базы спектрометра и установки нейтронного концентратора длиной 12.5 m на основе суперзеркал Ni/Ti с $m = 2$ (рис. 1, табл. 1).

Нейтронный концентратор (комплект зеркальных секций и вспомогательное оборудование, необходимое для его установки на первой пролетной базе спектрометра ДИН-2ПИ) был спроектирован в Отделении нейтронных исследований ПИЯФ (Гатчина). Комплект зеркальных секций с многослойным отражающим напылением был изготовлен в ПИЯФ, а вспомогательное оборудование в опытном производстве ЛНФ ОИЯИ (г. Дубна).

Вариантные расчеты [2] с целью оценки и выбора оптимальных параметров концентратора привели к сле-

дующей конфигурации. Зеркальная часть нейтронотова включает в себя два участка: прямой и сходящийся. Длина прямого участка (входное отверстие сечением 160×180 mm) равна 1800 mm. Длина сходящегося участка (концентратора) равна 10 700 mm. Сечение сходящегося нейтронотова изменяется от 160×180 mm на входе до 70×120 mm на выходе. Отражающее покрытие концентратора равно $m = 2$. Расстояние от источника

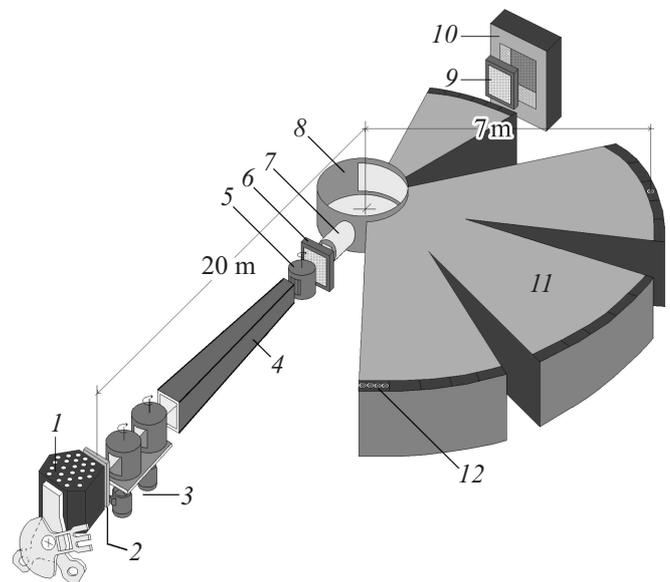


Рис. 1. Схема спектрометра ДИН-2ПИ и его основные характеристики после модернизации: 1 — активная зона реактора ИБР-2М, 2 — замедлитель, 3 — система вращающихся коллиматоров, 4 — суперзеркальный нейтронный концентратор длиной 12.5 m, 5 — селектор-монокроматор, 6 — монитор 1, 7 — щелевой коллиматор, 8 — стол для образцов в вакуумной камере, 9 — монитор 2, 10 — ловушки прямого пучка, 11 — вакуумные нейтроноты второй пролетной базы, 12 — He³-детекторы.

Таблица 1. Характеристики спектрометра ДИН-2ПИ

Характеристика	Значения
Замедлитель	Вода, 300 К
Расстояние от замедлителя до образца, m	20.023
Расстояние от образца до детектора, m	7.0
Углы расстояния	5°–135°
Размеры пучка на образце, mm	70 × 120
Плотность потока нейтронов на образце для $E_0 = 10 \text{ meV/cm}^2\text{s}$	$1 \cdot 10^4$
Поток нейтронов на образце $E_0 = 10 \text{ meV, n/s}$	$8.4 \cdot 10^5$
Диапазон начальной энергии, meV	1–50
Энергетическое разрешение $\Delta E_0/E_0, \%$	4–10
Отношение эффект/фон в упругом пике для стандартного ванадиевого рассеивателя, $E_0 = 50 \text{ meV}$	2000

нейтронов (гребенчатого водяного замедлителя) до входа в зеркальный нейтронпровод равно 5650 mm.

Программа пусковых работ включала в себя получение следующих основных характеристик:

- пространственное распределение нейтронного потока в камере образца (на входе в камеру образца и на ее задней заглушке);
- спектральная интенсивность монохроматических нейтронов в интервале энергий от 1 до 20 meV;
- переход к абсолютным значениям интенсивности; оценка фактора выигрыша, даваемого нейтронным концентратором;
- разрешающая способность спектрометра и ее энергетическая зависимость;

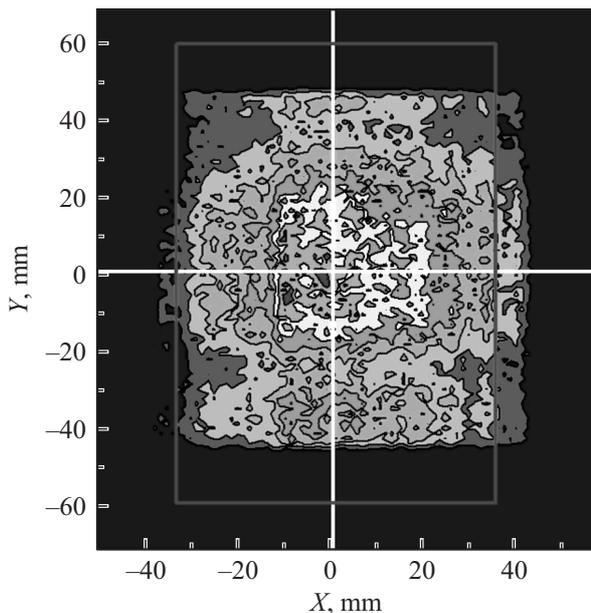


Рис. 2. Пространственное распределение нейтронного потока на входе в камеру образца ($E = 18.6 \text{ meV}$). Более светлый тон отвечает большей плотности потока.

— отношение „эффект–фон“ в указанном рабочем диапазоне энергий падающих нейтронов.

Пространственное распределение интенсивности нейтронного пучка в камере образца было определено на входе в камеру образца и на ее задней крышке (на выходе из камеры образца). Измерения проводились с помощью позиционно чувствительного детектора размерами 100 × 100 mm. Характерное распределение интенсивности нейтронов энергии 18.6 meV показано на рис. 2. Видно, что с точностью до разрешения детектора ось нейтронного пучка проходит через центр камеры образца (пересечение белых линий).

Интенсивность монохроматических нейтронов на образце

Оценка абсолютной интенсивности монохроматических нейтронов была выполнена для начальной энергии $E_0 = 3 \text{ meV}$, для которой мы располагали наиболее достоверными данными, полученными ранее. Несложные вычисления показывают, что доля нейтронов этой энергии, рассеянных стандартным ванадиевым образцом (цилиндрический слой диаметром $d = 70 \text{ mm}$, высотой $H = 120 \text{ mm}$), составляет приблизительно 6%. В случае изотропного рассеяния, что для ванадия близко к действительности, доля рассеянных нейтронов, падающих на детектор, будет равна его относительному телесному углу:

$$M = \Omega/4\pi,$$

где $\Omega = S/(L)^2$ — телесный угол детектора; $S = 40 \times 42 \text{ cm}^2$ — площадь детектора, $L = 700 \text{ cm}$ — длина второй пролетной базы спектрометра.

Подставив значения в формулу, получаем $M = 2.7 \cdot 10^{-4}$.

Интенсивность счета на детекторе составляет $I \approx 4000 \text{ pulse/h}$. Следовательно, с учетом эффективности детектора для нейтронов с $E_0 = 3 \text{ meV}$ (η порядка 0.9) интенсивность падающих на детектор нейтронов I будет приблизительно 1.2 n/s.

Отсюда находим, что полное число нейтронов, рассеянных образцом в угол 4π :

$$I/M \sim 1.2/2.7 \cdot 10^{-4} \sim 0.44 \cdot 10^{-4} \text{ n/s.}$$

Тогда интенсивность падающих на него нейтронов с учетом ослабления и поглощения в образце составляет

$$J \sim 0.44 \cdot 10^{-4} / 0.06 \cdot 0.94 \sim 7.8 \cdot 10^{-4} \text{ n/s.}$$

Зная площадь образца ($7 \times 12 \text{ cm}^2$), находим, что поток монохроматических нейтронов энергии $E_0 = 3 \text{ meV}$, падающий на него, равен

$$F \sim 8 \cdot 10^5 / 7 \cdot 12 \sim 1 \cdot 10^3 \text{ n/ms.}$$

Сравнение результатов эксперимента и расчета [2] спектральной плотности потока нейтронов в центре камеры

Таблица 2. Сравнительные характеристики нейтронных спектрометров неупругого рассеяния [4,5]

Характеристика при $E_0 = 4.6 \text{ meV}$ (4.2 \AA)	IN5	IN6	CNCS	ДИН-2ПИ	
				2006 г.	2012 г.
Разрешение в упругом пике	$180 \mu\text{eV}$	$170 \mu\text{eV}$	$100 \mu\text{eV}$	$210 \mu\text{eV}$	$260 \mu\text{eV}$
Плотность потока нейтронов на образце, $\text{n/cm}^2\text{s}$	$7 \cdot 10^4$	$9 \cdot 10^4$	$1 \cdot 10^5$	$4 \cdot 10^2$	$2.4 \cdot 10^3$ $\sim 0.3 \cdot 10^{5*}$
Полный поток нейтронов на образце, n/s	$S = 10 \text{ cm}^2$ $7 \cdot 10^5$	$S = 15 \text{ cm}^2$ $14 \cdot 10^5$	$S = 7.5 \text{ cm}^2$ $7.5 \cdot 10^6$	$S = 150 \text{ cm}^2$ $0.6 \cdot 10^5$	$S = 50 \text{ cm}^2$ $1.2 \cdot 10^5$ $\sim 1.6 \cdot 10^{6*}$

Примечание. Ожидаемые значения при использовании холодного замедлителя.

образца спектрометра ДИН-2ПИ, приведенных к абсолютной шкале интенсивности, показано на рис. 3.

Оценка фактора выигрыша за счет использования нейтронного концентратора была выполнена также для начальной энергии $E_0 = 3 \text{ meV}$. При оценке плотности потока нейтронов до и после установки нейтронного концентратора во внимание принимались следующие факторы.

Параметры до установки нейтронного концентратора:

- интенсивность счета на детекторе $\sim 600 \text{ pulse/h}$ (среднее по измерениям за 3 года);
- вес ванадиевого образца в пучке — 290 г;

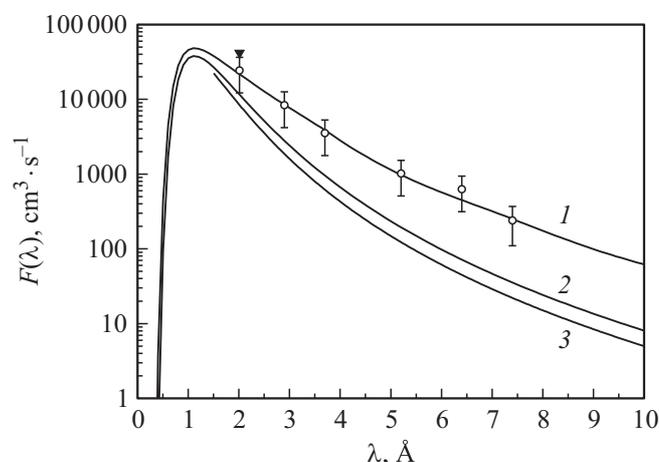


Рис. 3. Плотность потока нейтронов в центре камеры образца спектрометра ДИН-2ПИ в абсолютной шкале интенсивности. Сравнение результатов расчета (ПИЯФ) и эксперимента (2012 г.). Расчет „сшит“ с экспериментальными значениями в точке 3 meV . При расчетах использовались следующие параметры: размеры источника — $200 \times 200 \text{ mm}$, спектр нейтронов источника — максвелловское распределение с температурой 360 K . Оцененный на основе приведенных цифр фактор выигрыша оказывается равным $G(3 \text{ meV}) \approx 8$. 1 — расчет ПИЯФ при наличии нейтронного концентратора; 2 — расчет ПИЯФ в отсутствие нейтронного концентратора; 3 — экспериментально измеренный нейтронный спектр, испускаемый прежним (до реконструкции ИБРа) замедлителем; \circ — результаты эксперимента на стандартном образце ванадия; \triangle — интенсивность монохроматических нейтронов с энергией 18.6 meV по активации золотой фольги (С.С. Павлов).

- мощность реактора — 1.5 MW ;
- наличие на входе в камеру образца щелевого коллиматора, уменьшающего интенсивность в 2 раза.

Параметры после установки нейтронного концентратора:

- интенсивность счета на детекторе — 4000 pulse/h ;
- вес ванадиевого образца в пучке — 87.5 g ;
- мощность реактора — 2 MW ;
- щелевой коллиматор отсутствует.

Из приведенных данных следует, что ожидаемый фактор выигрыша должен составить $G \approx 7.5-8.5$. Согласно рис. 3, выигрыш за счет нейтронного концентратора должен составлять приблизительно от 5 до 5.5 раз. „Недостающий“ выигрыш в $\sim 30-40\%$ связан с новым гребенчатым замедлителем, установленным на канале № 2, и увеличением нейтронного потока за счет модернизации активной зоны реактора. Приведенная на рис. 3 кривая 3 представляет собой экспериментально измеренный нейтронный спектр, испускаемый прежним замедлителем [3], нормированным с кривой 1 в точке $\lambda = 5.2 \text{ \AA}$ ($E = 3 \text{ meV}$) с учетом фактора выигрыша $G = 8$.

Разрешающая способность спектрометра

Разрешение спектрометра, оцененное как полуширина пиков упругого рассеяния на стандартном ванадиевом образце для нескольких начальных энергий нейтронов, показано на рис. 4, где оно сравнивается с соответствующими данными, полученными до установки нейтронного концентратора и реконструкции ИБРа.

Некоторое ухудшение разрешения, которое нарастает по мере уменьшения энергии падающих нейтронов (на больших энергиях около 5%, на малых — 25%), объясняется ростом длительности нейтронного импульса, испускаемого замедлителем, связанным с новым режимом вращения подвижного отражателя реактора.

Сравнительные характеристики лучших зарубежных нейтронных спектрометров неупругого рассеяния и современного варианта спектрометра ДИН-2ПИ приведены в табл. 2.

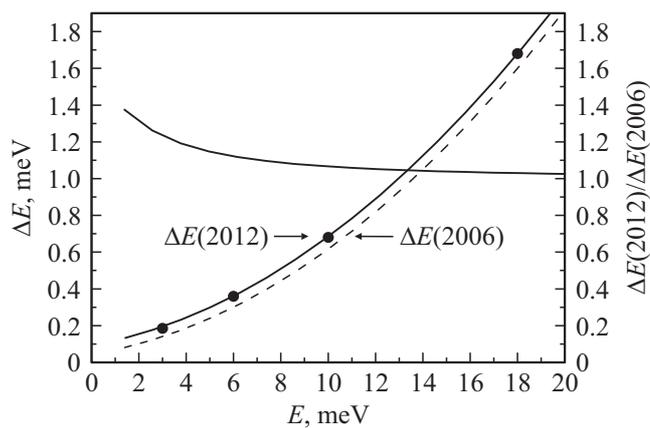


Рис. 4. Сравнение разрешающей способности спектрометра ДИН-2ПИ как функции энергии падающих нейтронов до и после модернизации активной зоны ИБР-2 и установки на спектрометре нейтронного концентратора.

Таким образом, оснащение спектрометра ДИН-2ПИ суперзеркальным нейтронным концентратором увеличило плотность потока холодных нейтронов на образце почти на порядок. Это дает возможность не только существенно сократить время проведения экспериментов и улучшить точность измерений, но и заметным образом (в 2–4 раза) уменьшить размеры исследуемых образцов.

Работа выполнена при финансовой поддержке Госкорпорации „Росатом“ по контракту № Д.4ф.43.90.13.1042.

Список литературы

- [1] Морозов В.М. и др. Система двояных вращающихся коллиматоров спектрометра ДИН-2К: Препринт ФЭИ-2506. Обнинск, 1996. 20 с.
- [2] Pusev I. et al. // Nucl. Instr. Meth. 2002. Vol. A 492. P. 105.
- [3] Ступак А.И., Новиков А.Г., Тараско М.З. Энергетически-временная плотность потока тепловых нейтронов в замедлителе реактора ИБР-2. Препринт ФЭИ-1957, Обнинск, 1989.
- [4] Guide to Neutron Research Facilities at the ILL. Grenoble, France. 1998.
- [5] <http://neutrons.ornl.gov/instruments/SNS/CNCS/equipment.shtml>