

## МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНЫЙ НЕЙТРОННЫЙ СПЕКТРОМЕТР НА ИМПУЛЬСНОМ ИСТОЧНИКЕ ИН-06 ИЯИ РАН

С. П. Кузнецов<sup>1</sup>, И. В. Мешков<sup>1</sup>, Р. А. Садыков<sup>2</sup>, В. С. Литвин<sup>2</sup>,  
Ю. А. Лапушкин<sup>1</sup>, А. А. Алексеев<sup>2</sup>, Э. А. Коптелов<sup>2</sup>

*Проведены испытания элементов многофункционального нейтронного спектрометра, предназначенного для одновременного определения параметров атомной и надатомной структуры и динамических параметров вещества, находящегося в конденсированном состоянии. Измерен спектр нейтронов детектором прямого пучка, размещенным в положении образца на 20-метровой пролетной базе образец-источник. Получены дифрактограммы порошка промышленных алмазов в широком диапазоне переданных импульсов. Определены разрешение дифрактометра обратного рассеяния и разрешение дифрактометра высокой интенсивности.*

**Ключевые слова:** нейтронный спектрометр, нейтронное рассеяние, дифрактометрия, конденсированное состояние вещества.

*Введение.* Многофункциональный нейтронный спектрометр (МНС), создаваемый совместно Физическим институтом им. П. Н. Лебедева и Институтом ядерных исследований Российской академии наук предназначен для одновременного определения параметров атомной и надатомной структуры, фононных спектров и других термодинамических параметров вещества, находящегося в конденсированном состоянии [1].

Такого рода исследования особенно важны вблизи точек фазовых переходов, в процессе синтеза или роста кристаллов, при изучении морфологии, структуры и динамики биологических объектов, жидких кристаллов и мицеллярных растворов, при поиске взаимосвязи структуры новых материалов с их макросвойствами. В МНС используется

<sup>1</sup> ФИАН, Россия, 119991 Москва, Ленинский пр-т, 53; e-mail: ckuz@sci.lebedev.ru.

<sup>2</sup> ИЯИ РАН, Россия, 117312 Москва, Проспект 60-летия Октября, 7а.

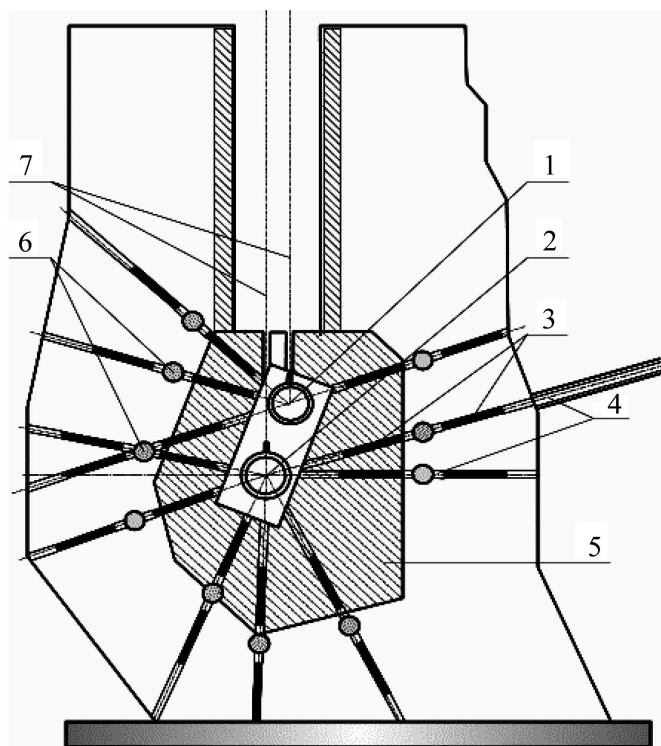


Рис. 1: *Нейтронный источник ИН-06. 1, 2 – нейтронные мишени, 3 – шиббер, 4 – нейтроновод, 5 – защита, 6 – вспомогательный колодец, 7 – пучки протонов. Замедлитель не показан.*

высокая проникающая способность нейтронного излучения и времяпролетная методика определения энергии и длины волны рассеянных нейтронов.

МНС состоит из блоков дифрактометрии высокого разрешения, высокой интенсивности, малоуглового рассеяния, а также из блоков спектрометрии неупругого и квазиупругого рассеяния высокого разрешения и высокой интенсивности.

Таким образом, МНС сочетает в себе возможности нейтронного дифрактометра, спектрометров неупругого, квазиупругого и малоуглового рассеяния нейтронов, работающих одновременно в режиме реального времени. Перечисленные возможности МНС могут быть реализованы только при использовании источников нейтронов нового поколения, одним из которых является интенсивный импульсный нейтронный источник ИН-6 на базе линейного ускорителя протонов ИЯИ РАН.

*Основные элементы спектрометра.* В качестве источника нейтронов используется светящаяся поверхность замедлителя, расположенного над нейтронной мишенью ИН-06 [2, 3]. По проекту ИН-06 состоит из двух независимых источников нейтронов, распо-

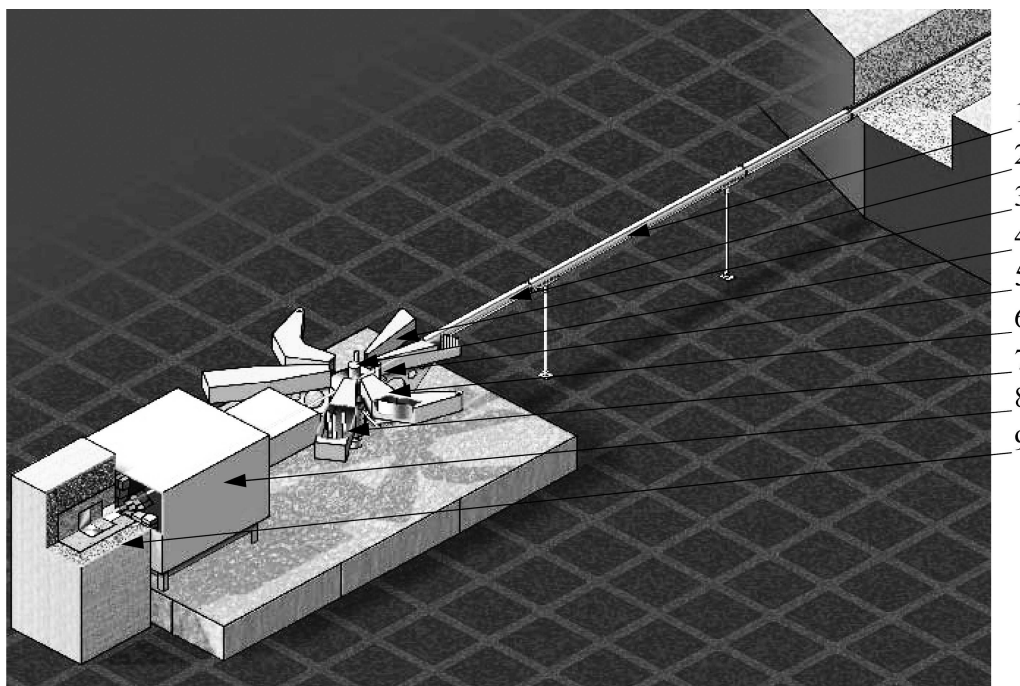


Рис. 2: Блок-схема МНС. 1 – вакуумируемый нейтроновод, 2 – блок сменных коллиматоров, 3 – дифрактометр обратного рассеяния, 4 – стол образца, 5 – дифрактометр высокой интенсивности, 6 – спектрометр квазиупругого и неупругого рассеяния высокой интенсивности, 7 – спектрометр квазиупругого и неупругого рассеяния высокого разрешения, 8 – дифрактометр малозугового рассеяния, 9 – ловушка прямого пучка.

ложенных каждый в своем боксе в общей биологической защите, и способных работать одновременно (рис. 1). Различие определяется длительностью импульса протонов, направленных на нейтронобразующую мишень. В первом боксе располагается вольфрамовая мишень с водяным замедлителем, на которую подается пучок протонов с параметрами, определяемыми ускорителем. Наличие вспомогательных колодцев позволяет размещать на пучке нейтронов дополнительное оборудование, например, прерыватель потока нейтронов для уменьшения длительности нейтронного импульса и фона, что может быть использовано для увеличения чувствительности блоков неупругого рассеяния. Проектом предусмотрен накопитель-группирователь протонов [4], который позволит генерировать импульсы протонов длительностью 0.25 мкс со средней интенсивностью в телесном угле  $4\pi \sim 10^{15}$  нейтр/с, что существенно расширит возможности источника для ведения фундаментальных исследований в области физики конденсированного вещества, ядерной физики, биологии, химии и т.д.

На рис. 2 представлена проектная блок-схема МНС. Основными элементами спектрометра являются:

– Вакуумируемый нейтроновод, предназначенный для уменьшения поглощения и увеличения доли тепловых и холодных нейтронов в спектре.

– Блок сменных коллиматоров, предназначенный для формирования апертуры и размеров падающего на образец пучка нейтронов в зависимости от размеров образца и в соответствии с требуемым разрешением.

– Блок образца, предназначенный для установки и юстировки образцов, контейнеров, эталонов, криостатов и других технологических объемов относительно оси пучка нейтронов.

– Блок дифрактометра обратного рассеяния, предназначенный для порошковой дифрактометрии, содержит пакет He-3 детекторов (СНМ18), сфокусированных по времени пролета и расположенных в геометрии отражения назад внутри вакуумируемой камеры.

Количество детекторов в пакете – 13.

Разрешение – 0.3–0.5%.

Диапазон углов рассеяния – 150–165°.

Диапазон определяемых размеров – 0.05–0.5 нм.

– Блок дифрактометра высокой интенсивности состоит из двух каналов, в каждом из которых на расстоянии 35 см от образца располагаются нейтронные He-3 детекторы (СНМ17) с углами рассеяния 85° и 95° соответственно. Стенки каналов изготовлены из борированного полиэтилена.

– Блок квазиупругого и неупругого рассеяния высокой интенсивности состоит из фокусирующего монохроматора из пирографита, бериллиевого фильтра и He-3 детектора, размещенных в вакуумируемой камере, и предназначен для определения динамических параметров вещества, таких как коэффициент самодиффузии, спектр молекулярных колебаний, фононный спектр и т.д.

Площадь отражающей поверхности зеркала-монохроматора –  $40 \times 20 \text{ см}^2$ .

Чувствительность по переданной энергии – 0.1 мэВ.

Угол рассеяния (центр монохроматора) – 57°.

Диапазон переданных энергий – 0–300 мэВ.

– Блок квазиупругого рассеяния высокого разрешения состоит из кристаллов анализаторов (монокристаллы пирографита, кремния, цинка), бериллиевого фильтра, детекторов и коллиматоров, расположенных в геометрии отражения назад и разме-

щенных в вакуумируемой камере, предназначен для определения динамических параметров вещества.

Число независимых каналов – 3.

Разрешение – 1%.

Угол рассеяния – 15, 25, 35°.

Диапазон переданных энергий – 0–300 мэВ.

– Блок малоуглового рассеяния состоит из 2-координатного позиционно-чувствительного детектора с изменяемым расстоянием образец-детектор и детектора прямого пучка, которые размещены в вакуумируемой камере. Блок предназначен для определения параметров надатомной и надмолекулярной структуры вещества.

Площадь рабочей поверхности детектора –  $40 \times 80 \text{ см}^2$ .

Диапазон определяемых размеров – 1–100 нм.

Расстояние образец-детектор – 5–10 м.

Угол рассеяния – 0–7°.

Проектные параметры блоков МНС не являются рекордными, что, конечно, ограничивает круг задач, решение которых возможно на спектрометре, однако, как отмечалось выше, главная особенность МНС заключается в сочетании возможностей нескольких установок на одном пучке нейтронов. Предлагаемая схема, на наш взгляд, является сбалансированной с точки зрения светосилы, разрешения и фоновых условий.

Первая пролетная база источник-образец  $L_1$  для всех элементов МНС выбирается, исходя из требуемого разрешения и светосилы блоков спектрометра, с учетом оптимального соотношения пролетных баз источник-образец  $L_1$  и образец-детектор  $L_2$  в дифрактометре малоуглового рассеяния и конкретной геометрии физического зала нейтронного источника.

Разрешение по переданному импульсу и энергии определяется шириной нейтронной вспышки, пролетными базами  $L_1$  и  $L_2$  и другими параметрами конкретных блоков.

Во всех блоках используется сканирование по времени пролета  $t$  при фиксированном угле рассеяния  $\alpha$ . При этом величина вектора рассеяния  $Q$  может быть выражена через полную длину пролета  $L = L_1 + L_2$ , время пролета и синус угла рассеяния:

$$Q = \frac{2m}{\hbar} \cdot \left( \frac{L \cdot \sin(\alpha)}{t} \right) = \frac{4\pi \sin(\alpha/2)}{\lambda}. \quad (1)$$

Здесь  $\lambda$  – длина волны нейтрона. Если предположить, что переменные  $L$ ,  $t$  и  $\alpha$  независимы, полное разрешение дифрактометра ( $\Delta Q/Q$ ) можно выразить через временную

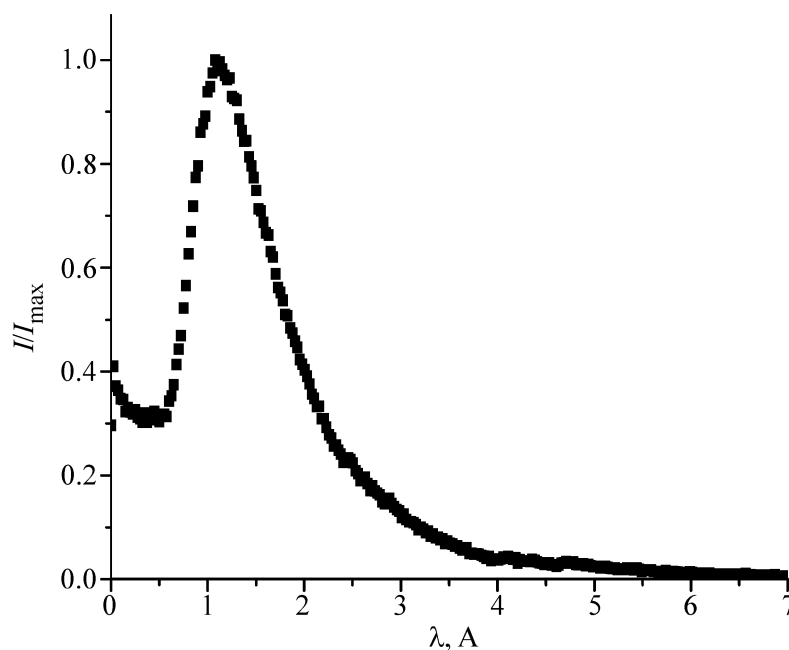


Рис. 3: Спектр нейтронов, нормированный на максимум, измеренный детектором прямого пучка, расположенным на месте образца на 20 м пролетной базе образец-источник.

неопределенность  $\Delta t$  и неопределенности расстояния  $\Delta L$  и угла  $\Delta\alpha$ :

$$\frac{\Delta Q}{Q} = \left[ \left( \frac{\Delta t}{t} \right)^2 + \left( \frac{\Delta L}{L} \right)^2 + (\Delta\alpha \cdot \text{ctg}\alpha)^2 \right]^{1/2}. \quad (2)$$

Из формулы (2) видно, что лучшее разрешение достигается при углах рассеяния, близких к  $180^\circ$ . В блоке дифрактометра обратного рассеяния для увеличения интенсивности рассеянных нейтронов применяется временная фокусировка нейтронных детекторов. При этом расположение детекторов выбирается так, чтобы время пролета было одинаково для рассеянных нейтронов с одинаковым переданным импульсом вне зависимости от начального импульса нейтрона и угла рассеяния. Расстояние от образца до детектора зависит от угла рассеяния и определяется по формуле [5]:

$$L_2(\alpha) = L_1 \times \left[ \left( \frac{1 + L_2(\pi)/L_1}{\sin(\alpha/2)} \right) - 1 \right]. \quad (3)$$

В дифрактометре высокой интенсивности детекторы располагаются под углами, близкими к  $90^\circ$ , и на малых расстояниях образец-детектор (в нашем случае  $L_2 = 35$  см).

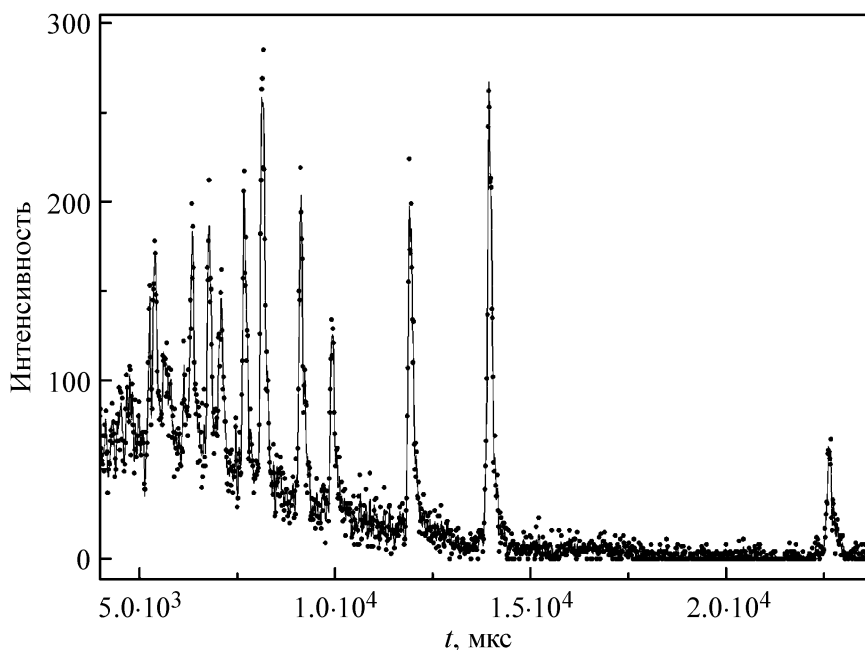


Рис. 4: Дифрактограмма порошка промышленных алмазов, полученная на времяпролетном дифрактометре обратного рассеяния (частота протонного пучка 25 Гц).

*Результаты испытаний.* В настоящее время введены в эксплуатацию вакуумируемый нейтронотвод, блоки дифрактометра обратного рассеяния и дифрактометра высокой интенсивности. Испытания производились при следующих параметрах источника нейтронов: частота протонных импульсов 1–50 Гц, ширина 90 мкс, энергия протонов 209 МэВ.

Измерен спектр падающих на образец нейтронов (рис.3). Измерения производились детектором прямого пучка, размещенным в положении образца на 20-метровой пролетной базе. Спектр характеризуется ярко выраженным пиком тепловых нейтронов, максимум которого приходится на длину волны  $\approx 1.3$  Ангстрема.

Получены дифрактограммы порошкового образца промышленных алмазов (рис. 4, 5), параметры кристаллической решетки которого хорошо известны, а размеры монокристаллических зерен в образце позволяют использовать его в качестве эталонного при определении инструментального разрешения. В результате проведенных измерений разрешение дифрактометра обратного рассеяния составило 0.5%, а дифрактометра высокой интенсивности  $\approx 3\%$ , соответственно, что находится в хорошем согласии с расчетными значениями. Из полученной дифрактограммы может быть определена ширина импульса тепловых нейтронов, которая определяется шириной

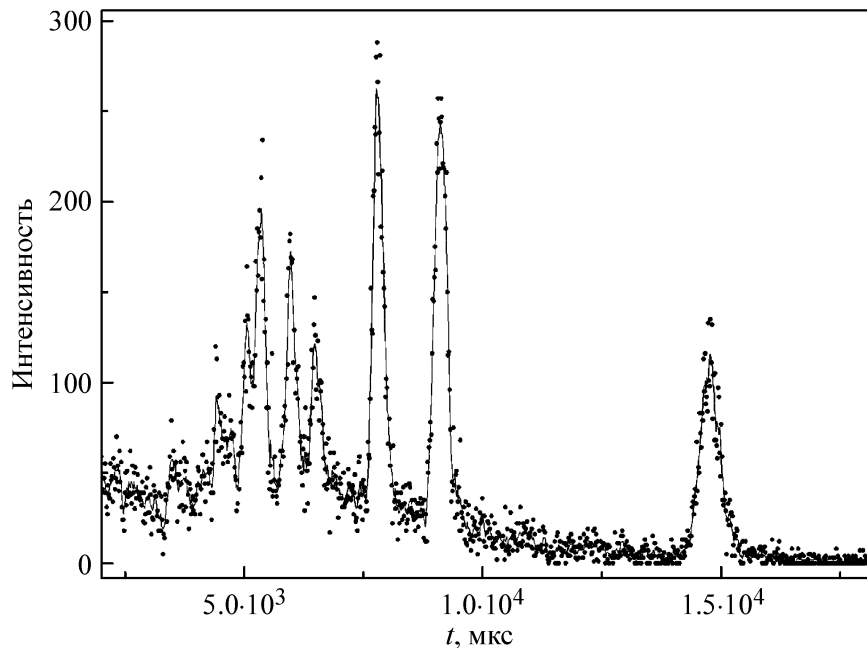


Рис. 5: Дифрактограмма порошка промышленных алмазов, полученная на дифрактометре высокой интенсивности (частота протонного пучка 25 Гц).

протонного импульса, временем замедления нейтронов и временем диффузии нейтронов в замедлителе. Из ширины брегговских пиков на полученной дифрактограмме была оценена длительность импульса тепловых нейтронов – 130 мкс при протонном импульсе 90 мкс. Следовательно, при данной конструкции замедлителя минимальная ширина импульса тепловых нейтронов составляет 90 мкс.

*Заключение.* Проведенные эксперименты показали работоспособность испытанных блоков МНС. Дальнейший прогресс в реализации данного проекта связан с достижением проектных параметров протонного ускорителя и с созданием и испытанием блоков неупругого рассеяния и малоуглового дифрактометра.

Работа была поддержана Минобрнауки, Госконтракт № 16.518.11.7021.

В заключение авторы считают своим приятным долгом выразить благодарность Михаилу Ивановичу Грачеву и Владимиру Александровичу Федченко и всем сотрудникам Отдела экспериментального комплекса за успешный запуск ИН-06 и создание полноценной инфраструктуры источника.



Л И Т Е Р А Т У Р А

- [1] А. И. Исаков, С. П. Кузнецов, А. Д. Перекрестенко и др., Препринт ФИАН №18, (ФИАН, Москва, 1994).
- [2] В. С. Литвин и др., Поверхность № 11, 3 (2010).
- [3] А. С. Жуков, Н. М. Соболевский, А. Д. Перекрестенко, Препринт ИЯИ РАН № 1140/2005, 18 (2005).
- [4] Ю. В. Рябов и др., ФТТ **52**(5), 957 (2010).
- [5] К. Уиндзор, *Рассеяние нейтронов от импульсных источников* (М., Энергоатомиздат, 1985).

Поступила в редакцию 16 октября 2012 г.